

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СТАБИЛИЗАЦИИ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА НА НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Данная статья посвящена исследованию методов стабилизации положения антропоморфных роботов на неустойчивой поверхности, проведен анализ и моделирование алгоритмов управления с последующей отладкой на учебном человекоподобном роботе фирмы Minirobot Corp., *Robonova Metal Fighter 2*. Робототехника является одним из важнейших направлений научно-технического прогресса, в котором проблемы механики соприкасаются с проблемами управления и искусственного интеллекта. В итоге, робототехник отличается от узкого специалиста широким кругозором и системным мышлением. В большинстве случаев современные роботы – это «руки», манипуляторы, закрепленные на платформе и предназначенные для выполнения однообразной работы типа перемещения. К роботам также относятся устройства, работающие в тяжелых для человека средах и управляемые дистанционно, например роботы, которые выполняют работы на больших глубинах, в космосе, устройства для доставки снарядов и др., а также роботизированные игрушки. Робот – это электромеханическое, пневматическое, гидравлическое устройство или их комбинация, предназначен для замены человека в промышленности, опасных средах и др. Системы управления робототехнических устройства строятся на том же техническом базисе, что и все другие автоматические устройства. В современном мире, когда доминирующим течением является конвергенция технологий и наук, в управлении роботами интересными результатов достигают применением знаний человечества в области биологии и моделей поведения животных. В отличие от предыдущих исследований, предлагается заменить аналоговые датчики на цифровые. При этом, задействовать процедуру калибровки и фильтрации считываемых значений датчиков, выполнить предварительное моделирование процессов стабилизации, согласно выбранным алгоритмам.

Ключевые слова: робот; акселерометр; гироскоп; стабилизация; человекоподобный робот; исследование; робототехника.

В настоящее время активно ведутся разработки в области антропоморфной робототехники. Антропоморфная робототехника – это перспективное направление исследований, изучающее методы построения человекоподобных роботов и их управления. Создание узкоспециализированных роботов неэффективно. Антропоморфные (человекоподобные) роботы наиболее универсальны, т. к. могут заменить человека и работать различным инструментом: слесарным, строительным, хирургическим и т. д. Такой робот может выполнять задачи по разминированию местности, оказанию медицинской помощи, поиску предметов и т. д. Кроме того, направление антропоморфной робототехники является наукоемким, в следствие высокой сложности как конструкций роботов, так и систем управления этими конструкциями. Одной из самых актуальных и сложных задач, является задача стабилизации положения тела робота в пространстве при воздействии как силы зем-

ного притяжения, так и непредвидимых сторонних физических воздействий.

В предыдущих исследованиях [1] использовалось два аналоговых одноосных датчика угловой скорости (гироскоп), и один аналоговый двухосевой датчик измерения проекции кажущегося ускорения (акселерометр), при работе которых не применялось алгоритмов калибровки и фильтрации значений, что приводило к накоплению погрешности измерений в процессе непрерывной работы. Следует заметить, что аналоговые датчики имеют ряд недостатков: низкая устойчивость к помехам, низкая частота опроса, сложности при замене. Также в предыдущем исследовании минимальная задержка отклика системы составляла 0,7 секунд. Вышеперечисленные проблемы предыдущего исследования не позволяют использовать алгоритмы стабилизации в реальных системах контроля.

Для отладки алгоритмов используется антропоморфный робот фирмы Minirobot Corp., Robonova Metal Fighter 2 [2]. Двигательная система робота состоит из 17 сервоприводов, со свободой движения в 180 градусов по одной оси.

Краткие характеристики робота:

- вес: 1.2 кг;
- размеры: 325x200x100 мм;
- сервопривод: MRS-D2009SP (6 Вольт, 9 кг/см, 60град/0.2 сек);
- контроллер: MR-C3024FX (на базе ATmega128);
- язык разработки: roboBASICMF v2. 8.
- дополнительные возможности: MIDI – проигрыватель, ИК пульт ДУ.

Далее рассмотрим методы стабилизации, которые основанные на линейных и нелинейных системах автоматического управления (САУ). Линейные САУ могут быть описаны дифференциальными уравнениями (ДУ), а нелинейные САУ можно описать с помощью линейных ДУ.

С учетом особенностей робота и вышеизложенных САУ, предложим следующие методы стабилизации:

- Метод пошаговой коррекции (изменение положения сервоприводов на одну единицу, при отклонении от положения равновесия);

- Метод разностной коррекции с обратной связью двигателей (установка нужного положения сервоприводов и ожидание его достижения с помощью датчика обратной связи);

- Метод разностной коррекции с интегрированием положения двигателей.

Первый метод является довольно примитивным, и не может применяться в системах подобной сложности, так как имеет высокие временные задержки, но для сравнения, включим испытание данного метода в реальных условиях работы.

Два последних метода представляют собой линейную и нелинейную САУ, соответственно. Второй метод описывается законом управления с постоянной компенсацией, а третий – законом с динамической компенсацией. Для их наглядного моделирования, была создана модель простого двухшарнирного соединения в программе SimMechanics [3]. На рис. 3 показана механическая модель, которая состоит из двух вращающихся шарниров и двух тел.

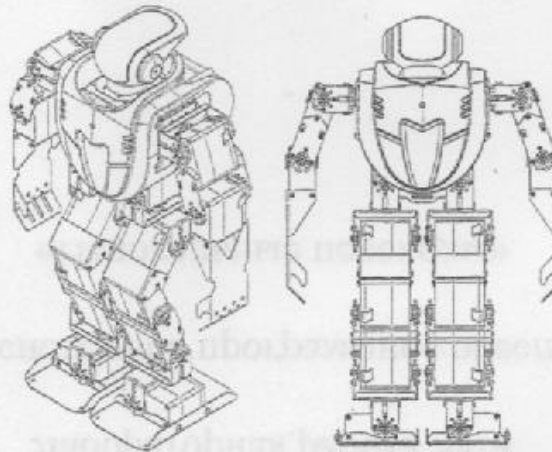


Рис. 2. Внешний вид робота Robonova Metal Fighter 2

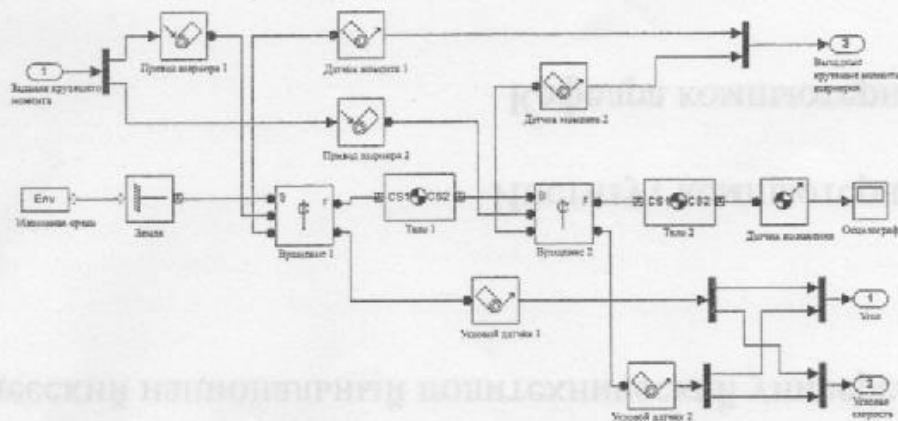


Рис. 3. Механическая модель робота в SimMechanics.

Модель принимает значения крутящих моментов на вход, и выдает на выходы углы поворота шарниров, угловую скорость и крутящий момент шарниров. Для упрощения расчетов принято, что массы сосредоточены в центрах шарниров.

Динамическая модель n-шарнирного робота-манипулятора может быть описана в лагранжевой форме [4]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (1)$$

где q – вектор шарниров;
 τ – вектор обобщенных сил, действующих на конечности робота;
 $M(q)$ – матрица инерции;

$C(q, \dot{q})$ – кориолисы (центробежные силы);
 $G(q)$ – гравитационный вектор. В уравнении (1) не учитываются моменты трения, которые всегда присутствуют в реальных системах.

Приведенные величины имеют следующие представления:

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}; \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}; M(q) = \begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) \\ M_{21}(q) & M_{22}(q) \end{bmatrix};$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_1(q, \dot{q}) \\ C_2(q, \dot{q}) \end{bmatrix}; G(q) = \begin{bmatrix} G_1(q) \\ G_2(q) \end{bmatrix};$$

$$M_{11}(q) = (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos q_2;$$

$$M_{12}(q) = M_{21}(q) = m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos q_2;$$

$$M_{22}(q) = m_2l_2^2;$$

$$C_1(q, \dot{q}) = -m_2l_1l_2(2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \sin q_2;$$

$$C_2(q, \dot{q}) = m_2l_1l_2\dot{q}_1^2 \sin q_2;$$

$$G_1(q) = (m_1 + m_2)gl_1 \cos q_1 + m_2gl_2 \cos(q_1 + q_2);$$

$$G_2(q) = m_2gl_2 \cos(q_1 + q_2).$$

Аргументы l_1 и l_2 указывают на длину первого и второго шарниров, m_1 и m_2 – их массы, соответственно.

Пусть для достижения равновесия системы примем вектор желаемых значений положения шарниров. Необходимо найти структуру регулятора, которая обеспечивает глобальную асимптотическую устойчивость заданной позиции робота.

Возьмем вектор $[\dot{q}^T \ddot{q}^T]^T$ как систему состояний, где:

$$\ddot{q} = \ddot{q}_d - \dot{q};$$

ПИД – регулятор для постоянной силы тяжести выражается как [5]:

$$\tau = K_p \ddot{q} - K_D \dot{q} + G(q_d); \quad (2)$$

Где $K_p > 0$ и $K_D > 0$ симметричные и типичные диагональные матрицы.

При использовании ПИД – метода адаптивной компенсации силы тяжести, уравнение принимает вид:

$$\tau = K_p \ddot{q} - K_D \dot{q} + G(q); \quad (3)$$

Различие законов управления (2) и (3) заключается в том, что значение $G(q_d)$ вычисляется автономно для (2) и адаптивно для (3). Чтобы доказать глобальную асимптотическую устойчивость, выберем следующую положительную определенную квадратичную форму для приведения к виду функции Ляпунова [6]:

$$V(\dot{q}, \ddot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \ddot{q}^T K_p \ddot{q} > 0 \quad \forall \dot{q}, \ddot{q} \neq 0. \quad (4)$$

Энергетическая интерпретация (4) показывает, что первый член выражает кинетическую энергию системы, а второй член выражает потенциальную энергию, хранящуюся в системе эквивалентной жесткости K_p и обеспечиваемая p – позиционной обратной связью.

Дифференцируя (4) по времени, и сохраняя константность q_d , получаем:

$$\dot{V} = \dot{q}^T M(q) \ddot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} - \dot{q}^T K_p \ddot{q}; \quad (5)$$

Решая (1) для $M(q)\ddot{q}$ и подставляя это в (5) дает:

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \dot{q}^T (M(q) - 2C(q, \dot{q})) \dot{q} + \dot{q}^T (\tau - G(q) - K_p \ddot{q}); \quad (6)$$

Первый член в правой части равен нулю из-за ко-симметрии матрицы $N = M - 2C$.

Тогда выбор функции-регулятора (3) дает:

$$\dot{V} = -\dot{q}^T K_D \dot{q};$$

Согласно вышеизложенному, функция-кандидат V уменьшается пока $\dot{q} \neq 0$ для всех системных траекторий. Можно сказать, что система достигает равновесия, когда $\ddot{q} = \ddot{q}_d - \dot{q} \equiv 0$

Вышеприведенное показывает, что любое положение равновесия манипулятора является глобально асимптотически устойчивым при регулировании линейного действия с помощью ПИД и нелинейного действия компенсации силы тяжести. Устойчивость обеспечивается для любого выбранного K_p и K_D , если они являются положительно определенными матрицами.

На рисунке 3 показана модель системы управления, включающая в себя ПИД – регулятор с компенсацией силы тяжести [4].



Рис. 3. Модель системы управления в программе Matlab – Simulink

Проведено симуляційне испытание для измерения динамической производительности ПИД-регулятора с постоянной и динамической компенсацией силы тяжести (рисунок 4). Испытание выполнено с шаговым изменением позиции шарнира, от начальной

$q_i = [0 \ 0]^T$ и до желаемой $q_d = [\pi/2 \ \pi/6]^T$. Робот

изначально находится в состоянии равновесия, под воздействием управляющего момента силы $\pi = G(q_i)$.

Усиление обоих регуляторов (2) и (3) установлены в:

$$K_p = \text{diag}\{260, 260\}, K_D = \text{diag}\{80, 80\}.$$

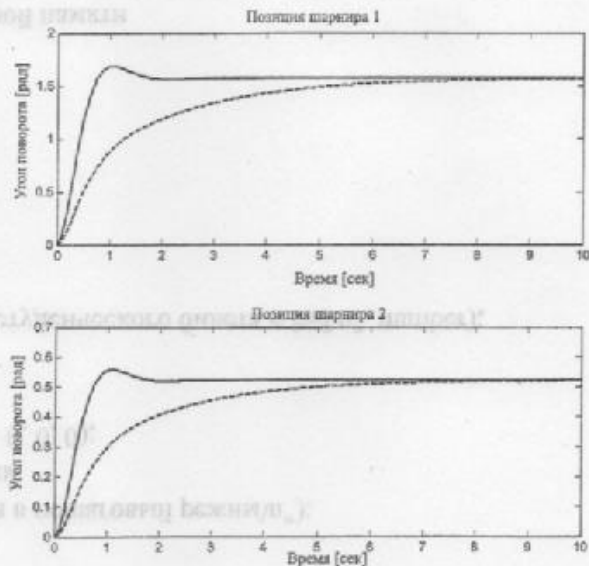


Рис. 4. Позиция шарниров в первом испытании.

Сплошная линия – при динамической компенсации, штрихованная – при постоянной компенсации

Полученные результаты отображены на рисунке 5. Хотя, с помощью динамического компенсирования желаемое положение устанавливается в обоих случаях, но при динамическом, достижение происходит быстрее. Это достигнуто с помощью использования более высоких моментов силы в начале движения.

При втором испытании проведено обратное предыдущему испытание: от положения

$q_d = [\pi/2 \ \pi/6]^T$ до желаемого $q_i = [0 \ 0]^T$. Существенной разницы с первым испытанием не наблюдалось.

Путем многочисленных повторений запуска, было выявлено преимущество использования динамического метода компенсации.

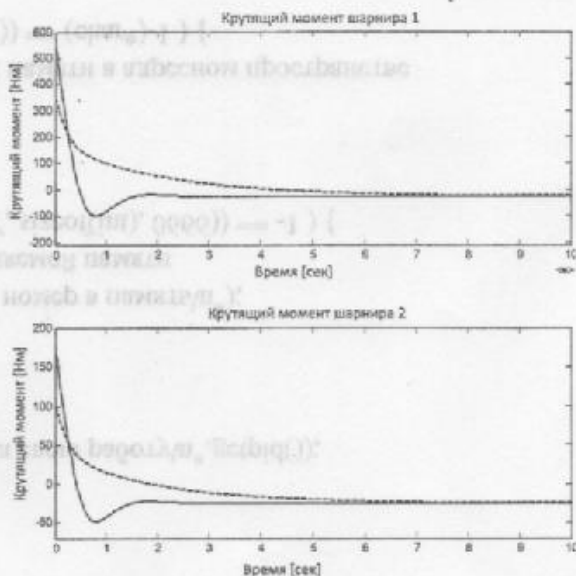


Рис. 5. Момент силы шарниров в первом испытании.

Сплошная линия – при динамической компенсации, штрихованная – при постоянной компенсации

Из графиков видно, что время достижения желаемой позиции шарниров, при использовании динамической компенсации составляет 0,85 секунды, а при использовании постоянной – 5-6 секунд.

Для определения преимуществ и недостатков методов стабилизации робота, математической и механической моделей недостаточно. Поэтому, необходимо испытать их на реальном роботе и оценить эффективность и целесообразность данных алгоритмов.

Предоставляемый в комплекте с роботом набор программ устройств позволяет производить написание алгоритма, его отладку, компиляцию и прошивку контроллера. Также имеются инструменты для ручного управления каждым сервоприводом отдельно. Сервоприводы пронумерованы и разделены на группы, что облегчает программисту составление и отладку алгоритма управления роботом.

Для определения положения робота в пространстве, недостаточно использовать прибор измерения проекции кажущегося ускорения – акселерометр, т. к. такой датчик лишен способности детектировать линейные изменения положения. Поэтому нужно также задействовать гироскоп. Гироскоп, в свою очередь, работает с незначительной погрешностью, которая со временем накапливается.

Микросхема MPU-6050 содержит как гироскоп, так и акселерометр. Данная интегральная схема зарекомендовала себя, как удобный в настройке и работе инструмент для использования в системах малого размера и энергопотребления. Работает микросхема по интерфейсу I2C, который поддерживает контроллер Robonova Metal Fighter 2.

При инициализации MPU-6050 предусмотрена программная процедура самокалибровки датчиков [7]. Далее можно использовать гироскоп и акселерометр как по отдельности, так и вместе, для получения более точных и валидных данных о положении объекта в пространстве. Благодаря совместной работе датчиков, задействуют процедуру фильтрации значений, в результате чего, получаем максимально точное значение положения с минимальными отклонениями.

Аргументами алгоритма стабилизации являются углы наклона датчика положения и ускорения по трем осям, а также, положения сервоприводов. В результате вычислений выполняется расчет нужного положения сервоприводов для достижения состояния баланса робота. В зависимости от характера и динамичности неустойчивой поверхности, определяется подходящий метод стабилизации и набор аргументов уравнений.

Метод пошаговой коррекции является самым простым. Заключается в считывании данных о положении объекта в пространстве, и ступенчатом изменении положения сервоприводов, до момента достижения стабилизации. Проблема использования такого метода заключается в округлении или фильтрации показаний датчика, без которой, сервоприводы все время будут передвигаться в малом диапазоне, согласно погрешности датчика положения. Округлив аргумент слишком грубо, можно выйти за пределы баланса. Впоследствии, сервоприводы будут дрожать. Найти коэффициент фильтрации, как правило, довольно сложно, и действителен он будет недолго.

Второй метод заключается в разностной коррекции с обратной связью двигателей. Благодаря возможности чтения положения каждого сервопривода, возможно организовать обратную связь. После расчета нужного положения дается команда установить двигатели в нужное положение. По достижению рассчитанного положения, обрабатывается следующее отклонение. Ликвидация дрожания сервоприводов приводит к новой проблеме: робот не может реагировать на изменения датчиков во время изменения положения сервоприводов.

Третий метод является методом разностной коррекции с интегрированием положения двигателей. В связи с неспособностью предыдущих методов удовлетворить нужды стабилизации, процедура чтения положения сервоприводов не используется. Вместо этого, измененное и предыдущее положение сервоприводов сохраняется в переменные. После этого, опытным путем подбирается программная задержка, которая отводится для завершения расчетов, и составляет около 100 мс.

Отладочная программа реализует все три метода стабилизации [8]. Для удобства тестирования использовался пульт дистанционного управления (ПДУ), с помощью которого, в рамках одного теста, не прекращая проверку, переключались алгоритмы стабилизации.

В результате тестирования выявлено преимущество метода разностной коррекции с интегрированием положения двигателей, заключающееся в более быстром достижении состояния равновесия. Таким образом теоретические расчеты на модели были подкреплены реальным экспериментом.

В дальнейшем алгоритм регулирования можно усовершенствовать, путем подбора времени задержки, и благодаря наличию точной математической и механической модели, проверять изменения без затрат на изготовление испытательного образца.

Список использованных источников

1. Robonova Stabilization Project [Электронный документ]. – Режим доступа : http://joanna.iwr.uni-heidelberg.de/projects/robonova_stabl.
2. Minirobot Corp. [Электронный документ]. – Режим доступа : <https://minirobot.co.kr/general-education>.
3. Simscape Multibody [Электронный документ]. – Режим доступа : <https://matlab.ru/products/simmechanics>.
4. Аналитическая механика. – М. – Л. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. – 594 с.
5. PID Controllers, Theory, Design and Tuning (2nd Edition) – K. J. Astrom & T. Hagglund, 1995. – 59 с.
6. Теория устойчивости. – Малкин И. Г. – Москва : Наука, 1966. – 531 с.
7. Using an Accelerometer for Inclination Sensing [Электронный документ]. – Режим доступа : <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1057.pdf>.
8. Robonova Overall program. [Электронный документ]. – Режим доступа : https://github.com/ozfiddler/sc-robonova-archive/tree/master/15_movement_templates.

О. В. Стрельцов,
канд. техн. наук, доцент,
О. О. Радов,
ОНПУ, м. Одеса, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА НА ПОХИЛІЙ ПОВЕРХНІ

Дана стаття присвячена дослідженню методів стабілізації становища антропоморфних роботів на нестійкій поверхні, проведений аналіз і моделювання алгоритмів управління з подальшим налагодженням на навчальному людиноподібному роботі фірми Mintrobot Corp., Robonova Metal Fighter 2. Робототехніка є одним з найважливіших напрямів науково-технічного прогресу, в якому проблеми механіки стикаються з проблемами управління і штучного інтелекту. У підсумку, робототехніка відрізняється від вузького фахівця широким кругозором і системним мисленням. У більшості випадків сучасні роботи – це «руки», манипулятори, закріплені на платформі і призначені для виконання однаманітної роботи типу переміщення. До роботів також відносяться пристрої, що працюють у важких для людини середовищах і керовані дистанційно, наприклад роботи, які виконують роботи на великих глибинах, в космосі, пристрої для доставки снарядів і тн. А також роботизовані іграшки. Робот – це електромеханічний, пневматичний, гідравлічний пристрій або їх комбінація, призначений для заміни людини в промисловості, небезпечних середовищах і тн. Системи управління робототехнічних пристроїв будуються на тому ж технічному базисі, що і всі інші автоматичні пристрої. У сучасному світі, коли домінуючою течією є конвергенція технологій та наук, в управлінні роботами цікавих результатів досягають застосуванням знань людства в області біології і моделей поведінки тварин. На відміну від попередніх досліджень, пропонується замінити аналогові датчики на цифрові. При цьому, задіяти процедуру калібрування і фільтрації зчитувальних значень датчиків, виконати попереднє моделювання процесів стабілізації, згідно з обраними алгоритмами.

Ключові слова: робот; акселерометр; гіроскоп; стабілізація; людиноподібний робот; дослідження; робототехніка

O. V. Streltsov, O. O. Radov,
Odessa national polytechnic university, Odessa, Ukraine

RESEARCH METHODS OF STABILIZATION ANTHROPOMORPHIC ROBOT ON A SLOPING SURFACE

This article is devoted to the study of methods for stabilizing the position of anthropomorphic robots on an unstable surface, analysis and simulation of control algorithms followed by debugging on the training humanoid robot of Mintrobot Corp., Robonova Metal Fighter 2. Robotics is one of the most important areas of scientific and technical progress in which problems mechanics come into contact with problems of control and artificial intelligence. As a result, robotics is different from a narrow specialist with a broad outlook and systemic thinking. In most cases, modern work – it's «hands», manipulators, fixed on the platform and designed to perform a monotonous work type of displacement. Robots also include devices that operate in heavy environments for humans and are remotely controlled, for example works that perform work at great depths, in space, delivery devices for shells, etc., as well as robotic toys. A robot is an electromechanical, pneumatic, hydraulic device or a combination thereof, designed to replace a person in industry, hazardous environments, etc. Robotics control systems are built on the same technical basis as all other automatic devices. In the modern world, when the convergence of technologies and sciences is the dominant trend, in the management of works interesting results are achieved using the knowledge of mankind in the field of biology and animal behavior patterns. In contrast to previous studies, it is proposed to replace analog sensors with digital ones. In doing so, use the procedure of calibrating and filtering the sensed values of the sensors, perform a preliminary simulation of the stabilization processes, according to the selected algorithms.

Key words: robot; accelerometer; gyroscope; stabilization; a human robot; delivery; robotics

Рецензенти: Муєсник М. П., д-р техн. наук, професор;
Крайник Я. М., канд. техн. наук.

© Радов А. А., Стрельцов О. В., 2017

Дата надходження статті до редколегії 20.09.2017

КІЇВСЬКА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ
ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧЕСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ