

И.М. АБДУЛЛАЕВ, магистрант гр. 24-12 (КазАТИУ)
Научный руководитель А.Б. ЖАНТЛЕСОВА, PhD,
ассоциированный профессор (КазАТИУ)
г. Астана

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ВЫСОКОТОЧНОЙ МОБИЛЬНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ

В настоящее время мобильные робототехнические комплексы активно интегрируются в различные сферы деятельности. Тем не менее, их применение в процессах, требующих высокой точности, нуждается в дальнейшем развитии. Поэтому актуальной задачей является исследование возможностей создания доступных роботизированных платформ, способных выполнять точные операции (лазерная гравировка, плоттерная печать, нанесение разметки и т.д.) на поверхности неограниченного размера.

В мобильной робототехнике системы, использующие исключительно простые системы одометрии (подсчет шагов/оборотов двигателя), не способны обеспечить требуемое качество обработки при выполнении высокоточных операций. Более сложные подходы, такие как SLAM (simultaneous localization and mapping) с использованием лидаров или камер, обеспечивают высокую точность. Однако их применение ограничено из-за необходимости использования дорогостоящих датчиков (например, лидаров) и требования значительных вычислительных ресурсов, что является барьером для широкого применения [1].

Целью работы является разработка гибридной системы управления (СУ) для мобильной платформы с кинематикой всенаправленного движения и шаговыми двигателями, обеспечивающей минимальную динамическую ошибку слежения.

В качестве основы платформы выбрана четырехколесная система всенаправленного движения (Mecanum). Выбор четырехколесной конфигурации обусловлен требованиями высокой точности позиционирования и повышенной динамической устойчивости. В отличие от трехколесных схем, четыре опорные точки обеспечивают расширенную опорную базу, что особенно важно при высоких скоростях и резких маневрах. Кроме того, четыре колеса гарантируют более равномерное распределение нагрузки на рабочую поверхность и обеспечивают голономное управление (три степени свободы: линейное движение по X , по Y и вращение ω) [2].

Разрабатываемая система платформы построена на принципах траекторного управления, которые являются фундаментальными в технологии обработки на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) [3].

Для обеспечения точного позиционирования в качестве электроприводов выбраны четыре независимых шаговых двигателя с микрошаговыми драйверами. Управление системой планируется реализовать на базе микроконтроллера ESP32, обладающего достаточной производительностью для оперативного управления приводами и высокой скоростью обработки данных, что очень важно для минимизации задержек в контуре управления. Кроме того, ESP32 позволяет обеспечить высокочастотную, независимую и синхронизированную генерацию импульсов на четыре канала управления шаговыми двигателями, а также поддержку беспроводной связи (Bluetooth/Wi-Fi) для дистанционного управления платформой [4].

Функциональная схема высокоточной мобильной роботизированной платформы представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Функциональная схема высокоточной мобильной роботизированной платформы

Главным этапом работы является разработка алгоритма, интегрирующего команды ЧПУ с физическим движением платформы, то есть преобразование команд «G-Code» в независимые команды для каждого из четырех шаговых двигателей. В отличие от традиционных станков, где оси X и Y управляются напрямую отдельными двигателями, мобильная платформа требует алгоритмического разложения движения. Для реализации такого движения платформы планируется реализовать задачу обратной кинематики. Решение этой задачи осуществляется через построение матрицы Якоби, которая преобразует желаемый вектор скорости платформы в требуемый вектор угловых скоростей колес. Полученные угловые скорости затем пре-

образуются в частоту электрических импульсов для шаговых двигателей. Эта частота рассчитывается с учетом всех механических параметров (количество шагов на оборот двигателя, микрошаг драйвера и передаточное число редуктора).

В отличие от стандартного популярного программного обеспечения с открытым исходным кодом для станков с ЧПУ «GRBL» (G-Code reference block library), которое напрямую сопоставляет команду X с одним двигателем, проектируемая система обрабатывает команду «G-Code» и использует обратную кинематику для расчета четырех уникальных, синхронизированных потоков импульсов, гарантируя, что все четыре колеса будут работать как единый механизм для выполнения заданного вектора движения.

В связи с вероятным проскальзыванием колёс по рабочей поверхности из-за микровибраций и механических люфтов, материала рабочей поверхности и колес или неверно заданной скорости движения платформы такая система будет накапливать ошибку позиционирования, для чего планируется разработка адаптивного алгоритма компенсации проскальзывания, что реализуется двухуровневой СУ. Первый уровень отвечает за непосредственное выполнение команд движения (управление шаговыми двигателями) с применением S-образных законов разгона/торможения для достижения максимально плавного и точного движения [5]. Второй уровень отвечает за навигацию, сравнение и коррекцию ошибок, возникающих на первом уровне благодаря внедрению замкнутого контура управления положением. В качестве прибора для высокоточного измерения фактического смещения платформы (Xфакт, Yфакт) относительно рабочей поверхности может использоваться оптический бесконтактный датчик положения.

Данный адаптивный алгоритм работает на высоком (втором) уровне управления и функционирует как ПИД-регулятор по положению. Его задача – постоянно сравнивать целевое положение (Xцель, Yцель), рассчитанное по «G-Code», с фактическим положением (Xфакт, Yфакт), полученным от оптического датчика.

На каждом такте управления рассчитывается мгновенная ошибка положения (E):

$$\begin{aligned} E_x &= X_{\text{факт}} - X_{\text{цель}}; \\ E_y &= Y_{\text{факт}} - Y_{\text{цель}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Ошибка положения преобразуется в корректирующие линейные скорости (ΔV_x , ΔV_y), которые необходимо добавить к исходному вектору движения, чтобы направить платформу обратно к целевой траектории.

$$\begin{aligned}\Delta V_x &= K_p \cdot E_x + K_i \int E_x dt + K_d \frac{dE_x}{dt}; \\ \Delta V_y &= K_p \cdot E_y + K_i \int E_y dt + K_d \frac{dE_y}{dt}.\end{aligned}\quad (2)$$

где K_p , K_i , K_d – настраиваемые коэффициенты ПИД-регулятора.

Выбор оптимальных коэффициентов ПИД-регулятора будет осуществляться на основе математического моделирования в среде Simulink (MATLAB).

Далее вектор движения платформы, полученный из «G-Code», дополняется корректирующим вектором ΔV , формируя итоговый вектор скоростей $V_{\text{расчет}}$:

$$V_{\text{расчет}} = \begin{bmatrix} V_x + \Delta V_x \\ V_y + \Delta V_y \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Итоговый вектор $V_{\text{расчет}}$ используется для последующего расчета управляющих импульсов. Схематически упрощенный алгоритм управления движением платформы представлен на рисунке 2.

Таким образом, гибридный алгоритм оперативно корректирует команды всем четырем шаговым двигателям, обеспечивая минимальную динамическую ошибку и высокоточную коррекцию траектории в реальном времени.

На основе моделирования в среде Simulink и последующей экспериментальной проверке ожидается, что разработанный гибридный алгоритм компенсации проскальзывания сможет значительно снизить абсолютную ошибку позиционирования платформы по сравнению с системами, использующими только одометрию шаговых двигателей. Внедрение S-образного профиля обеспечит снижение пикового значения рывка, что также приведет к уменьшению погрешности перемещения и повышению общего качества обработки.

Главное преимущество разработанной роботизированной мобильной платформы перед стандартными станками с ЧПУ – это неограниченная площадь рабочей поверхности при малых размерах платформы и доступной цене. В условиях, когда увеличение размера заготовки напрямую связано с ростом массогабаритов, стоимости и обслуживания станка, проектируемая гибридная система управления имеет высокую практическую значимость и коммерческие перспективы в области крупноформатной разметки, художественной печати, а также в промышленных, образовательных и рекламных целях.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма управления движением платформы

Список литературы:

1. Михайлов, Б.Б. Автономные мобильные роботы – навигация и управление / Б.Б. Михайлов, А.В. Назарова, А.С. Ющенко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – №2.
2. Tagliavini, L. Wheeled Mobile Robots: State of the Art Overview and Kinematic Comparison Among Three Omnidirectional Locomotion Strategies / L. Tagliavini, G. Colucci, A. Botta, P. Cavallone, L. Baglieri, G. Quaglia // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2022.
3. Жидяев, А.Н. Наладка и обработка на станках с ЧПУ: учебное пособие / А.Н.Жидяев, С.Р. Абульханов. Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 64 с.
4. Dwinanto, B. Prototype Smart Car Mecanum Wheel Fire Extinguisher Based on ESP 32 CAM with Bluetooth Combination / B. Dwinanto, A. A. Lubis, M. Karjadi, B. Yulianto, B. Harianto // Jurnal Indonesia Sosial Teknologi. – 2023.
5. Kombarov, V. S-Curve Algorithm of Acceleration/Deceleration with Smoothly-Limited Jerk in High-Speed Equipment Control Tasks / V. Kombarov, V. Sorokin, O. Fojtů, Ye. Aksonov, Ye. Kryzhyvets // MM Science Journal. – 2019.

Информация об авторах:

Абдуллаев Игорь Махмудович, магистрант гр. 24-12, КазАТИУ,
010011, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Женис, д. 62,
a.zhantlessova@kazatu.edu.kz.

Жантлесова Асемгуль Бейсембаевна, PhD, ассоциированный профес-
сор, КазАТИУ, 010011, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Женис, д. 62,
a.zhantlessova@kazatu.edu.kz.