

Компенсация погрешностей измерений одометрической системы мобильного робота на основе нелинейной модели движения с использованием нейросетевого аппарата

В. Д. Ворощенко, М. А. Горькавый

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

v.voroshenko@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача повышения точности позиционирования мобильной платформы, используемой в составе транспортно-манипуляционной робототехнической системы, предназначенной для обработки и сборки крупногабаритных деталей и сборочных единиц. Показано, что применение стандартной одометрической оценки по кинематической модели платформы приводит к накоплению ошибки позиционирования вследствие параметрической неопределённости модели и неучтённых нелинейных эффектов взаимодействия колёс с опорной поверхностью, что снижает точность выполнения технологических операций в совместном пространстве с роботом манипулятором. Предложен план эксперимента, основанного на сопоставлении одометрических данных мобильной платформы с эталонной оценкой. Был предложен подход к формированию обучающей выборки и разработке алгоритма коррекции одометрической оценки с использованием нейросетевой модели. По результатам сравнительного анализа методов коррекции одометрии обоснован выбор многослойного персептрона в качестве корректирующей модели как решения, обеспечивающего необходимую точность аппроксимации нелинейных зависимостей при выполнении инференса в пределах одного цикла управления. Сформулированы принципы формирования входного вектора признаков и подбора топологии сети с учётом ограничений на быстродействие.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, робототехнические системы, технологический процесс, нейросетевые модели, одометрия, оценка состояния, нелинейные эффекты, компенсация ошибок позиционирования, цифровой двойник

I. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС СБОРКИ

Современное авиационное производство характеризуется устойчивым движением в сторону гибкой автоматизации сборочных процессов. Применение коллаборативных манипуляторов и мобильных платформ (МП) в рамках единой транспортно-манипуляционной робототехнической системы (ТМРС) позволяет повысить эффективность технологических процессов (ТП) сборки крупногабаритных изделий сложной конфигурации [1, 2]. Настоящая работа рассматривает один из таких процессов, реализованных на ТМРС предприятия

авиационной промышленности (рис. 1), специализирующегося на изготовлении фюзеляжных секций из композиционных материалов.



Рис. 1. Транспортно-манипуляционная робототехническая система: а) вид сбоку; б) вид сверху

Ячейка ориентирована на сборку крупногабаритных сборочных единиц, а именно корпусных элементов фюзеляжа, принадлежащих одному конструктивному классу, но различающихся габаритными размерами и конфигурацией поверхности. Рассматриваемым объектом сборки является фюзеляжная секция из композиционных материалов с габаритами, сопоставимыми с размерами рабочей зоны манипулятора. ТП предусматривает соединение фюзеляжной панели с люком в единую герметизированную сборочную единицу посредством заклёпочных соединений. Характерной особенностью изделий данного класса является сложная конфигурация поверхности: зоны сопряжения расположены на боковых, верхних и наклонных поверхностях корпуса, вследствие чего для обеспечения досягаемости всех зон контура обработки требуется изменение ориентации изделия относительно манипулятора вплоть до полного разворота.

Функциональная модель ТП представлена на рис. 2.

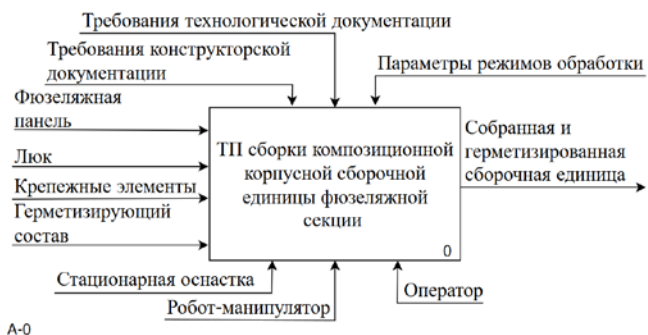


Рис. 2. Функциональная модель технологического процесса сборки КСЕ в нотации IDEF0

Входами процесса выступают фюзеляжная панель, люк, крепёжные элементы и герметизирующий состав. Управляющими воздействиями являются требования конструкторской и технологической документации и параметры режимов обработки. Выходом является собранная и герметизированная сборочная единица, прошедшая контроль качества. Механизмами реализации процесса служат стационарная оснастка, коллаборативный манипулятор KUKA LBR iiwa 7 и оператор. ТП является коллаборативным: часть операций выполняется манипулятором, часть оператором, отдельные переходы предполагают последовательное взаимодействие обоих участников в едином рабочем пространстве без разделительных ограждений. В составе процесса оператор выполняет установку фюзеляжной панели в оснастку, подготовку поверхностей под сборку, временную фиксацию пакета деталей прижимами, зенкование отверстий при необходимости и финальный контроль качества. Манипулятор выполняет нанесение герметизирующего состава, захват и установку люка в вырез с контролируемым усилием прижима, сверление отверстий через зафиксированный пакет и формирование заклёпочных соединений. Положение изделия в оснастке не определяется динамически, а задаётся фиксировано с помощью конструктивных элементов оснастки, по которым оператор ориентирует заготовку.

Ограничением базового варианта ТП является операция переориентирования изделия, выполняемая оператором вручную для обеспечения досягаемости всех зон контура обработки. Возложение данной функции на оператора сопряжено с риском нарушения допусков на положение изделия, что может приводить к браку сборочной единицы, а также обуславливает зависимость времени выполнения операции от индивидуальных характеристик оператора. В составе производственной среды предприятия используется МП KUKA YouBot для транспортировки изделий между участками. Платформа способна перемещаться в плоскости в произвольном направлении и одновременно изменять свою ориентацию, что обеспечивает полную свободу позиционирования изделия в рабочей зоне. А также может быть интегрирована в систему управления ячейкой программными средствами без замены оборудования. Предлагается использование платформы в роли активной оснастки позволяет реализовать переориентирование и перепозиционирование изделия как управляемое перемещение, обеспечивая воспроизводимость положения заготовки и адаптацию к различным типоразмерам номенклатуры без механической переналадки. Вместе с тем платформы с

всенаправленной колёсной схемой подвержены нелинейным эффектам качения, которые обуславливают накопление погрешности одометрической оценки, не позволяющей обеспечить позиционирование изделия в допусках технологической документации. Компенсация данной погрешности требует разработки корректирующей модели, способной аппроксимировать нелинейные зависимости между наблюдаемыми параметрами движения платформы и накопленной ошибкой положения, что определяет целесообразность применения методов машинного обучения.

Целью настоящей работы является разработка концепции подхода компенсации погрешности одометрической оценки МП на основе нейросетевой модели применительно к задаче позиционирования изделия в рамках ТП.

II. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ

МП KUKA YouBot реализована на основе всенаправленных колёс, обеспечивающего возможность перемещения в произвольном направлении без предварительной переориентации корпуса. Вместе с тем данная колёсная схема характеризуется рядом нелинейных эффектов, оказывающих влияние на точность одометрической оценки положения платформы [3]. К внутренним источникам погрешности относятся люфты в механических передачах, погрешности датчиков угловых перемещений и несимметрии колёсной базы относительно номинальных параметров. Внешние эффекты определяются условиями взаимодействия колёс с поверхностью: проскальзывание и пробуксовка роликов колёс, влияние неровностей и загрязнений опорной поверхности, изменение эффективного радиуса колеса под действием нагрузки от закреплённого изделия [4]. Совокупное действие перечисленных эффектов обуславливает накопление погрешности одометрической оценки, которая не компенсируется и в условиях требований точности технологической документации является недопустимой.

III. ПЛАН ЭКСПЕРИМЕНТА

Для идентификации нелинейных эффектов и количественной оценки их вклада в погрешность одометрии предложен план эксперимента, основанный на последовательном усложнении условий испытаний.

На первом этапе выполняется моделирование в имитационной среде на основе разработанной имитационной модели ТП, реализующей идеальную кинематическую модель (КМ) платформы, не содержащей нелинейных эффектов. Для набора тестовых траекторий, соответствующих режимам транспортировки и точного позиционирования, представленных на рис. 3, фиксируются оценки положения и ориентации платформы, угловые скорости колёс и их производные. Полученные данные рассматриваются как эталонные и служат базой для сравнения на последующих этапах.

На втором этапе реальная платформа выполняет тот же набор траекторий на ровной поверхности при идентичных управляющих воздействиях. Сопоставление результатов с эталонными данными позволяет выделить и количественно оценить составляющую погрешности, обусловленную внутренними нелинейными эффектами.

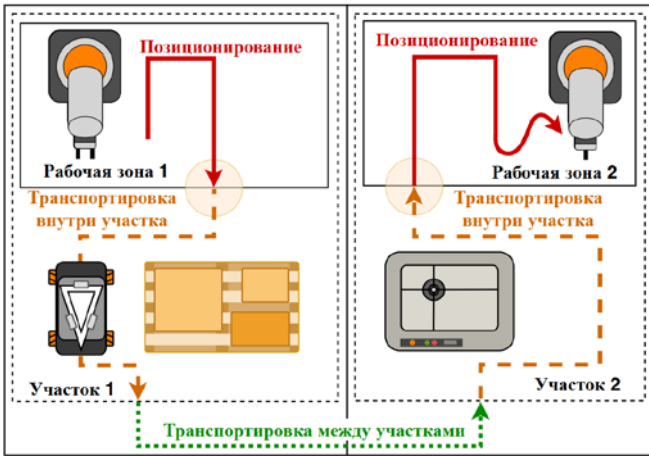


Рис. 3. Режимы работы МП в производственной среде

На третьем этапе эксперименты повторяются на поверхности с контролируемыми дефектами: порогами, локальными углублениями и выпуклостями, а также участками с изменённым коэффициентом трения. Сопоставление результатов третьего этапа с данными второго позволяет выделить дополнительную составляющую погрешности, обусловленную внешними эффектами взаимодействия колёс с поверхностью. Таким образом, последовательное сравнение трёх этапов обеспечивает отдельную идентификацию вкладов внутренних и внешних нелинейностей, формируя структурированный набор данных для последующего синтеза корректирующей модели

IV. АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ КОРРЕКЦИИ ОДОМЕТРИИ

Результатом экспериментального исследования является структурированный набор данных, отражающий отклонение фактического движения платформы от расчётного в различных режимах и условиях ТП. Задача последующего анализа состоит в идентификации зависимости ошибки одометрической оценки от наблюдаемых признаков движения и синтезе корректирующей поправки к оценке состояния платформы. Для решения данной задачи рассматривается ряд подходов.

Параметрическая калибровка кинематической модели на основе методов наименьших квадратов и расширенного фильтра Калмана позволяет уточнить геометрические параметры модели по экспериментальным данным, обеспечивая компенсацию систематической составляющей погрешности, обусловленной внутренними эффектами. Однако данный подход не описывает динамически изменяющиеся внешние эффекты и требует повторной калибровки при изменении условий эксплуатации.

Методы машинного обучения позволяют аппроксимировать нелинейную зависимость ошибки одометрической оценки от наблюдаемых признаков движения без явного задания физической модели [5]. Среди рассматриваемых архитектур многослойный перцептрон обеспечивает достаточную выразительность при умеренных требованиях к вычислительным ресурсам и допускает инференс в режиме реального времени [6]. Рекуррентные архитектуры, в частности LSTM, позволяют учитывать временную зависимость ошибки одометрии, однако уступают MLP по скорости

инференса [7]. Гауссовские процессы обеспечивают оценку неопределённости корректирующей поправки, однако вычислительно затратны при больших обучающих выборках [8]. Полиномиальная регрессия малозатратна вычислительно, но ограничена в описании нелинейных эффектов высокого порядка: увеличение степени полинома ведёт к переобучению на малых выборках [9]. Таким образом, MLP представляет собой наиболее сбалансированное решение с точки зрения точности, быстродействия и применимости в условиях, выходящих за рамки обучающей выборки.

V. НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ОДОМЕТРИИ

Задача нейросетевой модели состоит в формировании корректирующей поправки к одометрической оценке положения платформы. Обозначим штатную оценку состояния платформы, получаемую по КМ, как $q = (x, y, \theta)^T$. Тогда скорректированная оценка определяется как:

$$q^* = q + \Delta q \quad (1)$$

где $\Delta q = (\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)^T$ – поправка, вырабатываемая нейросетевой моделью на основе текущих измерений. Модель встраивается в контур управления модульно, без замены КМ, что обеспечивает возможность её отключения без нарушения работоспособности системы.

Входными переменными модели являются угловые скорости колёс и их производные, текущая оценка положения и ориентации платформы, а также признак режима движения. Выходом является вектор поправки Δq . Минимальный вариант архитектуры MLP с одним скрытым слоем представлен на рис. 4.

Использование нейросетевой модели для решения данной задачи обосновывается принципиальной сложностью аналитического описания совокупности нелинейных эффектов: внутренние и внешние нелинейности взаимодействуют между собой нелинейным образом, их параметры зависят от режима движения, нагрузки и состояния поверхности, что делает построение полной физической модели практически неосуществимым. Нейросетевая модель позволяет аппроксимировать это отображение непосредственно по экспериментальным данным без явного задания аналитической формы зависимости.

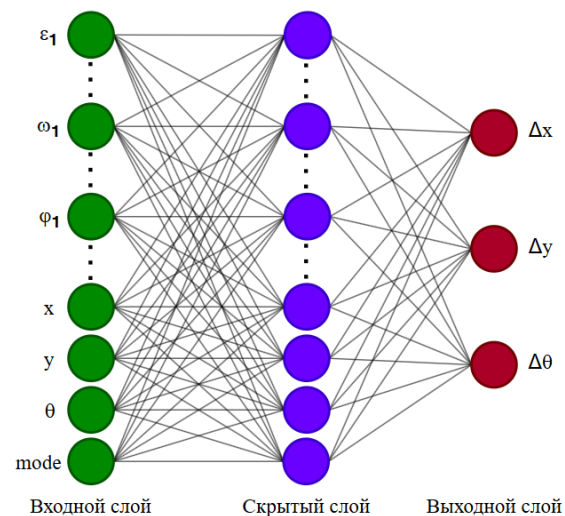


Рис. 4. Минимальная архитектура многослойного перцептрона для коррекции одометрической оценки положения МП

Топология многослойного персептрона определяется в ходе систематического подбора с использованием кросс-валидации, при этом процедура подбора организована по принципу наращивания сложности: начиная с минимальной архитектуры, число слоёв и нейронов увеличивается до достижения приемлемой точности аппроксимации на тестовой выборке.

Ограничение сверху на сложность сети определяется требованием выполнения инференса в пределах одного цикла управления платформой длительностью 10 мс. Латентность инференса оценивается непосредственно на вычислительной платформе системы управления и является жёстким критерием отсева: архитектуры, не укладывающиеся в данное ограничение, исключаются из рассмотрения независимо от точности аппроксимации.

Ограничение снизу определяется размерностью входного вектора и характером аппроксимируемой зависимости: для описания нелинейных перекрёстных взаимодействий между переменными, характерных для всенаправленных колес, архитектура с одним скрытым слоем малой размерности с высокой вероятностью окажется недостаточной, в связи с чем минимальной отправной точкой является архитектура с одним скрытым слоем, число нейронов в котором сопоставимо с размерностью входного вектора.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрен технологический процесс сборки фюзеляжных секций авиационного назначения из композиционных материалов на базе ТМРС и выявлены факторы, определяющие погрешность позиционирования МП в условиях производственной среды. Предложен план эксперимента, обеспечивающий раздельную идентификацию вкладов внутренних и внешних нелинейных эффектов в накопление одометрической погрешности. По результатам сравнительного анализа подходов к коррекции одометрии: параметрической калибровки, аналитических моделей проскальзывания, полиномиальной регрессии, гауссовских процессов, рекуррентных сетей и многослойного персептрона — в качестве основы корректирующей модели обоснован выбор MLP как наиболее сбалансированного решения по критериям точности, быстродействия в пределах одного цикла управления и устойчивости к переобучению. Сформулированы требования к топологии сети и входному вектору признаков, включающему угловые

скорости колёс, их производные, одометрическую оценку положения и признак режима движения.

Научная новизна работы состоит в предложении подхода коррекции одометрической оценки на основе нейросетевой модели рассматривается применительно к конкретному производственному ТП, в условиях которого совокупность нелинейных эффектов качения определяется не только характеристиками платформы, но и режимами её функционирования как активной технологической оснастки. Это обуславливает специфические требования к корректирующей модели по точности, быстродействию и устойчивости к переобучению, отличающие данную постановку задачи от обобщённых подходов к коррекции одометрии мобильных роботов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Zhao X., Chidambareswaran T. Autonomous mobile robots in manufacturing operations // 2023 IEEE 19th International conference on automation science and engineering (CASE). IEEE, 2023. С. 1-7.
- [2] Cherubini A. Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction / A. Cherubini, R. Passama, A. Crosnier, A. Lasnier, P. Fraisse // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2016. Vol. 40. P. 1–13.
- [3] Quan S. Mecanum Wheeled Mobile Platform Odometry Error Analysis and Correction / S. Quan, J. Chen // Proceedings of IncoME-V & CEPE Net-2020. Mechanisms and Machine Science. Springer, Cham, 2021. Vol. 105. P. 719–728.
- [4] Smieszek M. The impact of load on the wheel rolling radius and slip in a small mobile platform / M. Smieszek, M. Dobrzanska, P. Dobrzanski // Autonomous Robots. 2019. Vol. 43, № 8. P. 2095–2109.
- [5] Xu H. Estimating the Odometry Error of a Mobile Robot by Neural Networks / H. Xu, J.J. Collins // 2009 International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). IEEE, 2009. P. 378–385.
- [6] Шмалько Е.Ю. Поддержка средств автономной навигации мобильного робота с помощью внутренней модели на нейронной сети / Е.Ю. Шмалько, И.В. Прокопьев, А.И. Дивеев // Международный журнал открытых информационных технологий. 2023. Т. 11, № 2. С. 25-31.
- [7] Canbek K. O. Drift compensation of a holonomic mobile robot using recurrent neural networks / K.O. Canbek, H. Yalcin, E.A. Baran // Intelligent Service Robotics. 2022. Vol. 15, № 3. P. 399–409.
- [8] Hidalgo-Carrió J. Gaussian Process Estimation of Odometry Errors for Localization and Mapping / J. Hidalgo-Carrió, D. Hennes, J. Schwendner, F. Kirchner // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2017. P. 1–8.
- [9] Rigatos G.G. Mobile Robot Localization Based on a Polynomial Approach / G.G. Rigatos, S.G. Tzafestas // 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). IEEE, 2007. P. 1–6.