

Контроль качества розлива и маркировки пищевых продуктов с использованием интеллектуальных технологий

Хамед Эраки Мохамед Тахер¹, Благовещенский Иван Германович²,
Благовещенский Владислав Германович², Зубов Дмитрий Владимирович³

¹ Университет Мансура, город Мансура, Египет

² ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств»

³ ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»

Корреспонденция, касающаяся этой статьи, должна быть адресована Благовещенскому И.Г., ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств», адрес: 125080, город Москва, Волоколамское шоссе, дом 11. E-mail: igblagov@mgupp.ru

Статья посвящена повышению эффективности работы пищевого предприятия за счёт разработки и внедрения автоматизированной системы управления технологическим манипулятором на линии розлива и маркировки пищевых напитков с использованием интеллектуальных технологий. Показана необходимость в решении кинематических задач, особенно задач обратной кинематики манипулятора-робота. Проведенный в работе анализ показал, что существующие универсальные алгоритмы расчёта кинематики просты для записи в общем виде, но из-за ряда неустраняемых недостатков ресурсоёмки и обладают в некоторых случаях большой вычислительной погрешностью. Если технологические манипуляторы вынуждены работать именно в таких зонах, в которых этот метод приводит к существенным вычислительным ошибкам, то это может привести к замедлению движения манипулятора, что также приводит к снижению производительности, или потребовать вынужденно изменять режим работы с целью удаления рабочего органа от центра рабочей зоны, что займет больше места для каждого манипулятора. Поэтому для расчета кинематики предложено вместо универсального алгоритма использовать набор простых тригонометрических выражений по условиям конкретных движений, что позволяет сохранить требуемую точность во всём объёме рабочей зоны. Для управления манипулятором, поиска оптимальной траектории и взаимодействия с программой-моделью реальности (в среде SolidWorks) использовались программы, созданные в среде LabVIEW с инструментарием NI-SoftMotion в качестве контроллера для управления положением модели. Для автоматизации контроля качества розлива и маркировки пищевых продуктов и модернизации системы управления технологическим манипулятором разработаны алгоритмы решения обратной кинематической задачи для роботов типа PUMA, SCARA и KUKA, а также программное обеспечение, реализующее разработанные алгоритмы. Показаны результаты анализа использования системы оптического распознавания изделий, учитывающего совместное движение манипулятора и изделий. В результате проведенных исследований разработана система виртуального прототипирования мехатронной системы, позволяющая выбрать контроллер управлением движением манипулятора и требуемые двигатели и параметры оптимизации линии розлива и маркировки пищевых продуктов с использованием интеллектуальных технологий. По полученным результатам разработана улучшенная модель робота PUMA 560, к которой добавлены средства для передвижения манипулятора с использованием интеллектуальных технологий, что позволит повысить эффективность работы линии розлива и маркировки пищевых продуктов, улучшить их показатели качества.

Ключевые слова: контроль, качество розлива, маркировка, пищевые продукты, интеллектуальные технологии, система управления

Как цитировать

Эраки, Э. М. Т. Х., Благовещенский, И. Г., Благовещенский, В. Г., & Зубов, Д. В. (2020). Контроль качества розлива и маркировки пищевых продуктов с использованием интеллектуальных технологий. *Health, Food & Biotechnology*, 2(1). <https://doi.org/10.36107/hfb.2020.i1.s295>

Введение

Пищевая промышленность – одна из самых динамично развивающихся отраслей экономики. Новые технические возможности позволяют радикально решать типичные проблемы пищевых производств, связанные с соблюдением требований микробиологического режима, устранения ручного труда и связанных с ним технологических потерь, повышения стабильности уровня качества продукции, дают возможность оперативно изменять ассортимент и производительность предприятия (Благовещенская, 2009).

Ввиду большого количества ручного труда на пищевых предприятиях перспективно применение робототехнических комплексов, которые позволяют обеспечить большую гибкость производства, в том числе в задачах перемещения сырья, полуфабрикатов, готовой пищевой продукции, маркировки этих изделий, что особенно важно для малотоннажных производств, обладающих оборудованием, позволяющим производить пищевую продукцию различного ассортимента.

Ввиду высокой конкуренции на рынке напитков, производители вынуждены организовывать производство сезонных или приуроченных к каким-либо знаменательным событиям серий продукции, отличающихся не только составом напитков, но и видом бутылок и маркировки, что делает невозможным применение типовых автоматических линий, использующих традиционную тару и не поддающихся существенной перенастройке. Прогресс в развитии компьютерных технологий сделал возможным решение задач распознавания взаимного расположения физических объектов в режиме реального времени и управления исполнительными устройствами на основе адаптивных моделей, что позволяет снизить затраты энергии и повысить надёжность, безопасность и производительность агрегатов гибких линий пищевых производств.

Для того, чтобы машины и агрегаты гибких автоматизированных линий пищевых производств могли выполнять заданные задачи, необходимо разработать четкие траектории перемещений исполнительных органов манипуляторов, а для их реализации – законы изменения скоростей, сил и моментов соответствующих приводных устройств. Для поиска и реализации алгоритма управления манипуляторами при решении задач пищевых предприятий необходимо использование математических моделей процессов, протекающих в ходе работы производственной линии. Из вышеска-

занного следует, что проблема обеспечения динамично развивающейся пищевой промышленностью универсальными программно-аппаратными средствами управления робототехническими комплексами актуальна. Множество работ в этой области, особенно зарубежных авторов, свидетельствует об актуальности и востребованности выбранной темы исследования.

Целью настоящего исследования является повышение эффективности работы пищевого предприятия за счёт разработки и внедрения автоматизированной системы управления технологическим манипулятором с несколькими степенями свободы на основе имитационной модели.

Для реализации намеченной цели были поставлены следующие задачи исследования:

1. Разработка алгоритма управления технологическим манипулятором, обеспечивающим сохранение заданной точности позиционирования во всём пространстве рабочей зоны.
2. Исследование и разработка системы компьютерного зрения для обнаружения траектории движущихся цветных объектов и отслеживания движущихся по технологической линии объектов, с использованием камеры, расположенной на движущемся манипуляторе.
3. Создание общей структуры разработанной системы управления манипуляторами для контроля качества розлива и маркировки пищевых продуктов.
4. Разработка алгоритма структурного синтеза манипулятора для системы маркировки пищевой продукции предприятия

Объектом исследования является система управления линией розлива жидких пищевых продуктов.

Научная новизна данного исследования заключается в следующем:

1. Разработан новый метод управления манипулятором при помощи кинематического анализа с учётом особенностей рассмотренных типовых манипуляторов, позволяющий снизить вычислительные ошибки расчёта траектории и таким образом обеспечить заданную точность позиционирования во всей рабочей зоне.
2. Предложен новый метод решения задачи имитационного моделирования технологического манипулятора, отличающийся распределением функций между программными средами – быстрой (LabVIEW) и медленной, но точной (SolidWork), позволяющий рационально использовать вычислительные ресурсы.
3. Разработаны алгоритмы динамического ана-

- лиза манипуляционных механизмов для системы технологического транспорта.
4. Разработан метод контроля траектории манипулятора, позволяющий избегать нежелательных столкновений в рабочем пространстве.
 5. Разработаны численные модели манипуляционных механизмов, предназначенных для системы маркировки продукции.

Литературный обзор

Большими сторонниками внедрения кибернетических методов в промышленность были академик В.В. Кафаров (Кафаров, Макаров, 1990; Кафаров, 1968), профессора А.И. Бояринов, И.И. Артоболевский (Артоболевский, 2005) и ряд других учёных (Благовещенская, Злобин, 2005), заложивших основы моделирования и автоматизации сложных производственных линий. Академиком АН СССР И.И. Артоболевским были разработаны общие принципы создания машин-автоматов, в том числе применительно к пищевой промышленности (Артоболевский, 2005).

На сегодняшний день накоплен достаточный практический и теоретический объем информации по разработке и внедрению автоматизированных систем управления технологическими манипуляторами. Эти вопросы в своих работах всесторонне рассматривали следующие ученые – И.Р. Белоусов, А.А. Богуславский, С.Н. Емельянов, Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов, В.В. Сазонов, С.М. Соколов (Белоусов, Богуславский и др. 1999), П.Н. Белянин (Белянин, 2000), С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко¹, Д.В. Зубов (Зубов, 2017), И.М. Макаров (Макаров, 1986).

Большой вклад в создание и совершенствование манипуляторов, работающих на линиях производства пищевых продуктов, внесли: В.Ф. Филаретов, А.В. Зуев (Филаретов, Зуев, 2006), И.В. Скопинцев (Скопинцев, 2016), Юревич Е.И. (Юревич, 2005), S. Alavandar (Alavandar, 2008), С.М. Bastuchech (Bastuchech, 1989).

За последние годы предложены новые и усовершенствованные робототехнические устройства с несколькими степенями свободы на основе имитационной модели. Работы по созданию и внедрению автоматизированных систем управления технологическим манипулятором с нескольки-

ми степенями свободы с использованием интеллектуальных технологий проводили А.А. Воевода, Д.О. Романников, А.С. Мещанов, А.В. Николаева, С.В. Ульянов, И.Р. Камалиев, А.В. Некрасов, А.О. Титов, А.В. Уткин, С.А. Краснова, А.Г. Ахобадзе (Зубов, 2016), G.J. Awcock (Awcock, 1995), P. Baglietto (Baglietto, 1996), T. Benjanarasuth (Benjanarasuth, 2010), внесших большой вклад в усовершенствование работы робототехнических устройств и разработку встраиваемых в них программно-аппаратных интеллектуальных комплексов на основе использования систем компьютерного зрения, нейросетевых технологий, экспертных систем, генетических алгоритмов и т.д.

В общем случае для расчетов кинематических параметров технологических манипуляторов широко используется метод Денавита - Хартенберга, предлагающий матричное представление координат процесса (ДН-представление) (Craig, 2005). Несмотря на критику такого подхода для ряда особых случаев некоторые авторы В. Christie (Christie, 2009), E.R. Davies (Davies, 1990) предлагают решать обратную кинематическую задачу путём её сведения к оптимизационной задаче. Ряд авторов (Angeles, 1985), (Benjanarasuth, 2010) указывает на целесообразность и даже необходимость решения задачи управления манипулятором совместно с использованием динамической модели как самого манипулятора, так и его окружения. Многие авторы Н. Brian (Brian, 2008), S. Shital, N. Chiddarwar, V. Ramesh, Н. Chaudhary (Chaudhary, 2014) уделяют внимание алгоритмам решения обратной кинематической задачи с учётом имеющихся технологических ограничений, которые могут как усложнить, так и упростить решение задачи.

Ряд авторов предлагают использовать для управления аппарат искусственного интеллекта О.Ф. Alcin F. Ucar, D. Korkmaz. (Alcin, 2016), O. Khalal, A. Mellit, M. Rahim, H. Salhi, A. Guessoum (Khalal, 2007) – в недетерминированной среде и с меняющимися задачами, и в частности – искусственных нейронных сетей для решения задач обратной кинематики, для поиска управления манипулятором в условиях изменяющегося окружения. Достоинством таких систем является высокая адаптивность и расширяемость. Недостатком является вероятностный характер решения, не гарантирующий нахождение наилучшего управления. По результатам литературного обзора сделан вывод, что возможно для которых моделей роботов за счёт сни-

¹ Зенкевич, С. Л., & Ющенко, А. С. (2004). Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов (315 – 412). Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана.

жения универсальности методики можно снизить вычислительную сложность и повысить точность и быстродействие позиционирования.

Однако проведенный нами обзор и анализ состояния теории и практики создания и внедрения автоматизированных систем управления технологическим манипулятором с несколькими степенями свободы с использованием интеллектуальных технологий показал, что остается много нерешенных вопросов по контролю качества розлива и маркировки пищевых продуктов с использованием интеллектуальных технологий. Также, до настоящего времени не созданы математические модели многозвенных технологических манипуляторов типов SCARA, PUMA, KUKA, обеспечивающих сохранение заданной точности позиционирования во всём пространстве рабочей зоны; не имеется алгоритмов управления технологическим манипулятором, обеспечивающим оптимизацию работы линии розлива и маркировки пищевых продуктов.

До сих пор не рассматривалась возможность разработки и исследования системы компьютерного зрения для отслеживания движущихся по технологической линии розлива и маркировки пищевых продуктов, с камерой расположенной на движущемся манипуляторе.

В настоящей работе был учтен и проработан опыт предыдущих исследований, использованы рекомендации, приводимые авторами перечисленных трудов.

Методы

Поставленные в работе задачи решены с использованием теории автоматического управления, методов математического моделирования, теории принятия решений, методов сетевого планирования, методов оптимизации (динамическое программирование), теории алгоритмов и методов программирования, а также методов создания систем технического зрения, теории принятия решений, методов системного анализа и методов математической статистики. Вычисления в процессе исследований, численная и графическая обработка результатов производились с применением математического аппарата прикладных программ. Численная и графическая обработка результатов исследований производилась с применением MatLab, Labview, EDEM. Для управления манипулятором, поиска оптимальной траектории и взаимодействия с программой-моделью реальности (в среде SolidWorks) использовались программы,

созданные в среде LabVIEW с инструментарием NI-SoftMotion (в качестве контроллера для управления положением модели). Для разработки основных компонентов системы управления технологическим манипулятором с несколькими степенями свободы на основе имитационной модели использован объектно-ориентированный язык Delphi.

Исследование

Большинство современных роботов-манипуляторов классифицируются как объекты с вращающейся системой координат (Благовещенская, Злобин, 2005). Применение такой системы координат, как правило, связано с необходимостью преобразования координат и движений в различных системах координат.

Существует два вида методов решения задачи обратной кинематики: аналитический и численный. Некоторые задачи управления роботом манипулятором приводят к особым точкам и нелинейностям, усложняющим выработку управляющих воздействий. Для очень небольшого класса простых манипуляторов, например, кинетических манипуляторов, координаты которых задаются углами Эйлера, эти задачи управления были решены аналитически (Kucuk, 2004). Одним из путей решения задачи обратной кинематики роботов манипуляторов, является способ, в котором уравнения кинематики преобразуют в полином 16 степени.

В ряде случаев, при моделировании и расчете обратной кинематики, может быть полезна концепция мягких вычислений, особенно в тех случаях, когда задача решается многократно, например, для адаптивного управления роботом в режиме реального времени (Alavandar, 2008). Если число степеней свободы возрастает, то применять традиционные методы управления, становится все более сложно и особенно трудно решить задачу обратной кинематики.

Ряд авторов предлагают использовать для управления аппарат искусственного интеллекта (Angeles, 1985, Benjanarasuth, 2010). Достоинством таких систем является высокая адаптивность и расширяемость. Недостатком является вероятностный характер решения, не гарантирующий нахождение оптимального управления.

На основании проведенного литературного обзора работ по математическому моделированию кинематики и динамики машин и агрегатов, объединенных в производственные линии с учётом

их взаимодействия, взаимодействия их с окружающей средой был сделан вывод, что возможно снизить вычислительную сложность и повысить точность и быстродействие позиционирования моделей роботов за счёт снижения универсальности методики.

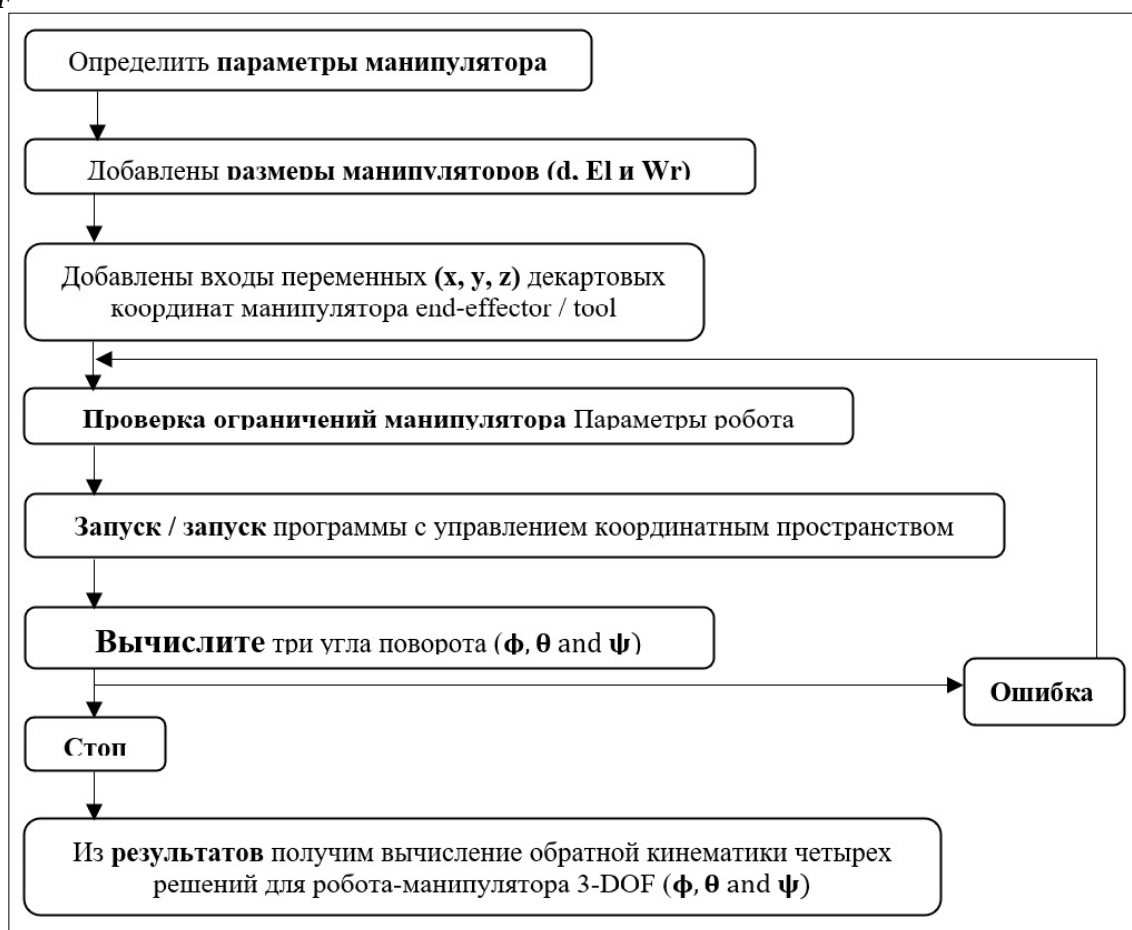
Существует два подхода к решению прямой и обратной задач кинематики: геометрические и алгебраические методы. В данном исследовании вместо традиционных методов предложен новый, разработанный путем математического моделирования вращательных движений 3-DOF робота-манипулятора (RRR) (геометрический подход), определены все параметры конструкции, а также их отношения, получены математические уравнения с геометрическими представлениями, осуществлено преобразование этих уравнений в LabVIEW для генерирования кодов программирования, а затем разработан интерфейс для передачи результатов в CAD программу, в частности – SolidWorks (Эраки, 2018). То есть по результатам проведенных исследований и полученных данных было предложено для расчёта

кинематики вместо универсального алгоритма использовать набор простых тригонометрических выражений, получаемых алгоритмически по условиям конкретных движений, что позволяет сохранить требуемую точность во всём объёме рабочей зоны.

Для снижения общих вычислительных затрат был разработан алгоритм выбора оптимальной траектории из исходного положения манипулятора в целевое, с учётом отбрасывания заведомо неоптимальных. Поскольку у манипулятора есть несколько степеней свободы, которые могут рассматриваться как отдельные переменные оптимизации, то задачу управления манипулятором для перевода его из одного состояния в другое, рассматривали как задачу условной дискретной оптимизации. Для её решения создан алгоритм, являющийся модификацией алгоритма ветвей и границ: в отличие от полного перебора, отбрасываются кандидаты на решение, которые уже не смогут быть лучше уже найденного оптимального. На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма, использующего полученный подход.

Рисунок 1

Блок-схема алгоритма обратного кинематического программного обеспечения робота-манипулятора 3-DOF



Для управления манипулятором, поиска оптимальной траектории и взаимодействия с программой-моделью реальности (в среде SolidWorks) использовались программы, созданные в среде LabVIEW с инструментарием NI-SoftMotion (в качестве контроллера для управления положением модели).

Использованное сочетание управляющего (оптимизирующего) модуля, созданного в среде LabVIEW, и моделирующего реальность модуля в среде SolidWork позволяет распределить функции и вычислительные ресурсы по разным ЭВМ с сохранением гибкости и производительности системы в целом. Сравнение возможностей встроенного программного обеспечения (ПО) компаний-производителей промышленных роботов с предлагаемой системой представлено на таблице 1.

Предлагаемый подход системы управления роботом манипулятором имеет ряд преимуществ по сравнению с имеющимися решениями:

- точные траектории, для получения которых не требуются обучающие точки (которые требуются для Aubo, Universal Robots);
- пользователь может задать любой критерий

оптимальности, помимо заранее предложенного (например, минимизация времени перемещения) и любой набор ограничений (заранее заданы ограничения на рабочую область и предельную мощность), благодаря чему может быть реализован сложный алгоритм движения в динамически изменяющейся окружающей среде;

- интерактивное моделирование и визуализация технологического процесса, что позволяет обеспечить совместную работу нескольких манипуляторов, находящихся вблизи друг друга;
- снижение необходимости в перекалибровке (она частично осуществляется путём адаптации модели манипулятора в среде SolidWorks), улучшение детализации и повторяемости движений, обеспечение достижения всех точек рабочей зоны и устранение столкновений;
- при необходимости пользователь может задать любой алгоритм движения на любом участке траектории.

Различия между предлагаемой разработанной методикой и традиционной методикой (DH) представлены в таблице 2.

Таблица 1

Сравнение предлагаемого подхода с встроенным ПО компаний-производителей промышленных роботов

Название производителя	Тип манипулятора	Принцип работы ПО
<u>Aubo</u> (Китай-США)	SCARA и несколько специальных типов, встречающихся только у этого производителя	Машинное обучение в сочетании с DH-представлением
<u>Dobot</u> (Китай)	SCARA и несколько специальных типов, встречающихся только у этого производителя	ПО на основе DH-представления
<u>Universal Robots</u> (Дания)	PUMA и несколько специальных типов, встречающихся только у этого производителя	Искусственный интеллект
<u>ABB</u> (Швеция-Швейцария)	KUKA и несколько специальных типов, встречающихся только у этого производителя	Машинное обучение
Предлагаемый подход	SCARA, PUMA, KUKA	LabVIEW на основе предлагаемых конструктивных аналитических методов

Таблица 2

Различия между предлагаемой методикой и традиционной методикой (DH)

Различия	Предлагаемая методика (сводит задачу к двумерной)	Традиционная методика Denavit–Hartenberg (DH) (3-трёхмерная задача)
Математические требования	Не содержит высоких требований к математическому обеспечению, т.к. не использует матриц	Использует гомогенные матрицы 4x4 заданной структуры (John J. Craig 2005)
Программного обеспечения	Легко реализуется программных пакетах (наша реализация – LabVIEW)	Высокие требования к математическому обеспечению, вызванные использованием матриц
Точность	Сохраняется точность вычислений	Вычисления производятся с ограниченной точностью (Taylor, 1979)
сингулярность	Использование «геометрического метода» для представления позиций и ориентаций обеспечивает четкую работу кинематики роботов, избегая сингулярностей	Сингулярность и нелинейные выражения совместных отношений являются основной проблемой в методе однородных матриц (Aydin and Kucuk, 2006)

Поскольку также важными задачами настоящего исследования были разработка и исследование системы обнаружения траектории движущихся цветных объектов с использованием интеллектуальных технологий, нами была изучена возможность разработки системы компьютерного зрения, работающей совместно с созданной системой управления роботом манипулятором.

Обзор и анализ работ, авторы которых ставили и решали задачи автоматизации, системного анализа и управления различными процессами пищевых производств с использованием систем компьютерного зрения (Петров, Благовещенская, Благовещенский, Ионов, 2019; Петряков, Благовещенская, Благовещенский, Митин, 2019; Гарев, Благовещенский, Назойкин, Макаровская, 2019; Гончаров, Благовещенский, Назойкин, Макаровская, 2019; Благовещенский, Макаровская, Благовещенская, Чувахин 2019; Балыхин, Благовещенский, 2018; Благовещенский, Носенко, 2015; Иванов, Благовещенская, Благовещенский, 2012; Alcin, 2016; Khalal, 2007) показал, что основные успехи современных систем управления различными производствами пищевых продуктов связаны со значительным прогрессом в области программных систем и цифровых видеотехнологий. Машинное зрение – это применение компьютерного зрения для промышленности и производства. В то время как компьютерное зрение – это общий набор методов, позволяющих компьютерам видеть. Областью интереса машинного зрения, как инженерного направления, являются цифровые устройства ввода-вывода и компьютерные сети, предназначенные для контроля производственного оборудования, таких как роботы-манипуляторы или аппараты для извлечения бракованной продукции (Балыхин, Борзов, Благовещенский, 2017; Благовещенская, Сантон Куннихан, 2017; Крылова, Благовещенский, Татарин, 2017; Назойкин, Благовещенский, Синча, 2019; Петряков, Благовещенская, Благовещенский, Крылова, 2018; Chaudhary, 2014). Машинное зрение является подразделом инженерии, связанное с вычислительной техникой, оптикой, машиностроением и промышленной автоматизацией. Одним из наиболее распространенных приложений машинного зрения является контроль/инспекция качества промышленных пищевых продуктов, таких как различные кондитерские изделия, халепекарные, молочные, мясные, мучкомольные и другие продукты питания и лекарственные препараты (Савостин, Благовещенская, Благовещенский, 2016; Благовещенская, Шаверин, Благовещенский, 2012; Носенко, Благовещенский, Шаверин, Благовещенская, 2014; Шаверин

А.В., Благовещенская, Благовещенский 2012; Благовещенская, Благовещенский, Назойкин 2015 и др.). Системы машинного зрения для этих целей используют цифровые и интеллектуальные камеры, а также программное обеспечение, обрабатывающее изображение для выполнения аналогичных проверок.

Современные системы управления типа KR C4 поставляются с операционной системой Windows XP и являются универсальными для работы со всеми типами роботов KUKA. Периферийные устройства оснащены USB-портами, портом Ethernet и опциональным интерфейсом для Profibus, INTERBUS, DeviceNet и PROFINET. Блок управления включает в себя промышленный компьютер, который общается с системным роботом при помощи MFC карты. Сигналы между манипулятором и системой управления передаются посредством, так называемой, DSE-RDW связи. DSE карта находится в блоке управления, RDW – в базе робота. Промышленные роботы KUKA нашли широкое применение в различных производственных областях, в том числе в пищевой промышленности: они используются для обработки пищевых продуктов, погрузки и разгрузки, паллетирования. Таким образом, очевидно, что есть все предпосылки для развития научных основ применения систем компьютерного зрения, работающих совместно с роботами манипуляторами в пищевой промышленности.

Управление роботом манипулятором отличается от управления другими промышленными объектами. Это связано с большим числом отдельно управляемых механических осей. Стоит отметить, что из-за особенности конструкции и расположения элементов в роботе-манипуляторе, существующих кинематических и динамических отношений между осями, они должны быть приняты во внимание для достижения требуемого качества процессов управления и должны быть учтены при разработке системы компьютерного зрения, работающей совместно с созданной системой управления роботом манипулятором.

Для управления манипуляционными системами необходимо уметь решать ряд задач управления, таких как: анализ кинематики робота и рабочего пространства; планирование движения; предварительный расчет сил и моментов; анализ динамической точности и идентификации кинематических и динамических параметров робота. В работе (Khalal, 2007) были представлены некоторые приемы анализа систем управления движением роботов, как обычной системой автоматизированного управления на основе точной математической

модели, что дает положительные результаты в плане отслеживания ошибок и надежности, но создаёт трудности разработки эффективного алгоритма из-за неопределенности в модели, вызванной неточной оценкой параметров модели. В работе М.Т.Х. Эраки (Эраки, 2018), предложено использовать ПИД-контроллер на базе внутренней модели управления (IMC) для управления двухзвенным SCARA роботом. ПИД-контроллер может быть создан путем применения серии Maclaurin расширения контроллеров IMC в общей обратной связи контуром с использованием фильтра высоких частот. Моделирование результатов показало, что предложенный метод управления угловой позиции SCARA робота- манипулятора на основе ПИД контроллера позволяет избавиться от статической ошибки. Для адаптивного управления роботом типа SCARA можно использовать технологию искусственных нейронных сетей (Эраки, 2018). Выходные сигналы искусственной нейронной сети регуляции подбирались таким образом, чтобы избежать нежелательных состояний системы. В результате, ошибка перемещения между роботом и заданным эталонным сигналом асимптотически сходилась к нулю. Производительность системы была продемонстрирована в симуляции. Полученные результаты моделирования свидетельствовали о надежности работы переменной структурой управления манипулятором.

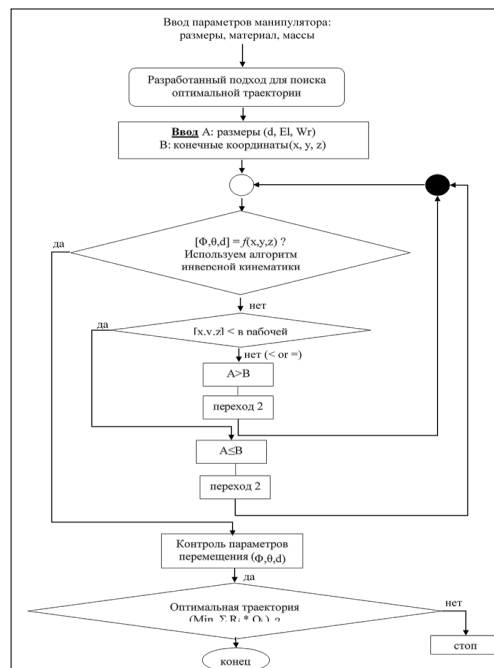
Использование современных систем компьютерного зрения с улучшенной системой распозна-

вания использовался для уточнения координат объекта или робота. Достижения в области 3D машинного зрения сделали возможным реакцию роботов на изменяющиеся условия среды и адаптацию к ней, что позволило применять роботов для работ, где нет жёсткого соответствия реальности проекту, что было очень трудно для роботов в прошлом. Роботы теперь могут брать объекты разных форм и ориентаций с конвейера (Эраки, Зубов, 2018). Системы компьютерного зрения, несомненно, позволили повысить гибкость систем управления роботами, а также повысить безопасность работы.

Были изучены различные системы компьютерного зрения для интеграции её с разработанной системой управления. Для этого были проведены экспериментальные исследования подбора различных систем компьютерного зрения для надежного отслеживания роботом движущихся объектов. Используемая система видения для отслеживания включала в себя: сбор данных, преобразование координат, инвариантное распознавание объектов. Разработанная программа LabVIEW с модулем технического зрения отслеживала положение динамического движущегося цветного объекта путем измерения его координаты x, y в пикселях от контрольной точки. Камеру предлагалось разместить на манипуляторе, что потребовало соответственного учёта в системе технического зрения движения манипулятора, т.е. совместной работы системы управления и системы технического зрения.

Рисунок 2

Общая структура разработанной системы управления манипуляторами для контроля качества розлива и маркировки пищевых продуктов



Общая структура разработанной системы управления манипуляторами для контроля качества розлива и маркировки пищевых продуктов представлена на рис. 2.

На основе проведенных исследований и полученных результатов разработан аппаратно-программный комплекс для наклеивания этикеток на готовую пищевую продукцию,

Разработана блок-схема алгоритма структурного синтеза манипулятора, совершающего поступательные и вращательные движения, предназначенная для системы маркировки пищевой продукции предприятия (рис.3).

Результаты и их обсуждение

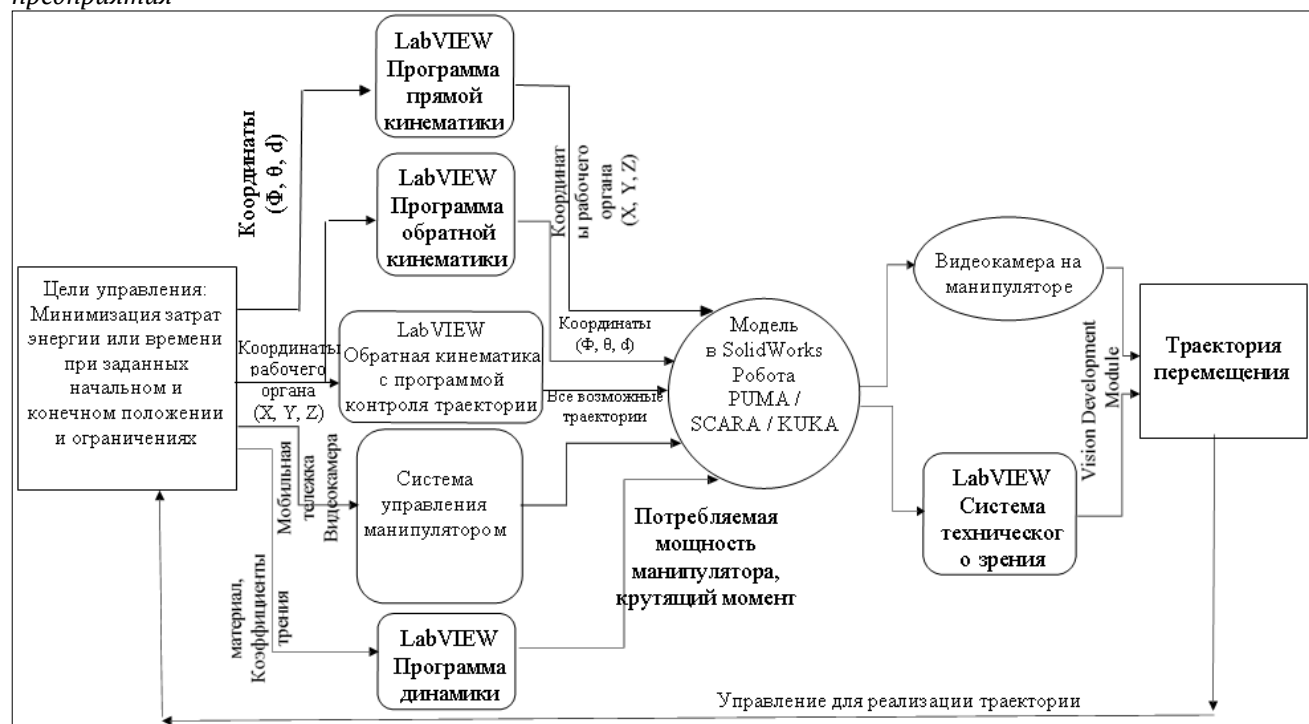
В результате проведенного обзора научно-технической литературы обнаружено, что единого общепринятого метода выбора оптимальной траектории движения роботов манипуляторов не существует. Поэтому были проведены исследования, результаты которых позволили разработать алгоритм управления технологическим манипулятором, обеспечивающий оптимизацию заданного критерия в условиях ограничений (по мощности источника питания и по геометрии рабочей зоны).

В данной работе показано, что гибкость перепрограммирования и простота работы с управлением движения манипуляторов путем выбора оптимальной траектории до сих пор не определены. Для решения данной задачи использовалась программа обратной кинематики и управления роботом KUKA, позволяющая контролировать порядок и расположение вращающихся двигателей. В результате мы получили 16 возможных траекторий концевой эффектора при переходе от одной точки к другой, что позволило определять оптимальную траекторию, выбрав минимальное значение таких параметров, как длина траектории, рабочее время, использованная энергия. Был разработан новый метод прямой и обратной кинематики для 3DOF робота-манипулятора. Решение задач обратной кинематики было осуществлено с помощью развитых геометрических методов.

Ввиду существующей низкой вычислительной сложности обнаружения траектории движущихся цветных объектов с использованием камеры, расположенной на движущемся манипуляторе, в данной работе исследована и разработана система компьютерного зрения для надежного слежения за движением цветных объектов. Экспериментально доказана возможность преобразования координат, инвариантного распознавания объектов с помощью системы машинного зрения. На основании

Рисунок 3

Блок-схема алгоритма структурного синтеза манипулятора для системы маркировки пищевой продукции предприятия



экспериментальных данных установлена зависимость для определения и измерения координат «х, у» динамического движущегося объекта в пикселях от опорной точки обнаружения по пути отслеживания на основе его цветового шаблона с программного комплекса LabVIEW и NI vision assistant. Опробовано использование программы компьютерного зрения для условий движущейся камеры, что подтверждает возможность установки камеры на роботе-манипуляторе в целях использования в различных промышленных приложениях. Показана возможность отслеживания пути обнаружения движущегося цветного объекта. Эта программа может быть использована для поиска всех возможных решений этой проблемы и экономии времени, которое занимают расчеты.

По запросам предприятий пищевой промышленности в связи с острой необходимостью автоматизации контроля качества розлива и маркировки пищевых продуктов в работе создана общая структура разработанной системы управления манипуляторами для контроля качества розлива и маркировки пищевых продуктов. Разработанная структура системы управления технологическим манипулятором обеспечивает оптимальную траекторию движения манипулятора во всём пространстве рабочей зоны за счёт моделирования и учёта физических свойств манипулятора и используемых объектов. Разработан алгоритм структурного синтеза манипулятора для системы маркировки пищевой продукции предприятия. Разработана система компьютерного зрения, работающая совместно с созданной системой управления манипулятором. Предложенная система управления роботом-манипулятором PUMA 560 может быть использована для выполнения многих технологических задач в самых разных отраслях пищевой промышленности.

Заключение

Полученные результаты позволили:

- разработать новый метод управления манипулятором при помощи кинематического анализа с учётом особенностей рассмотренных типовых манипуляторов, позволяющий снизить вычислительные ошибки расчёта траектории и таким образом обеспечить заданную точность позиционирования во всей рабочей зоне;
- предложить новый метод решения задачи имитационного моделирования технологического манипулятора, отличающийся распределением функций между программными средами – быстрой (LabVIEW) и медленной, но

точной (SolidWork), позволяющий рационально использовать вычислительные ресурсы;

- разработать алгоритмы динамического анализа манипуляционных механизмов роботов;
- разработать метод контроля траектории манипулятора, позволяющий избегать нежелательных столкновений в рабочем пространстве с использованием системы компьютерного зрения;
- разработать численные модели манипуляционных механизмов роботов, предназначенных для системы маркировки продукции.

Литература

- Артоболевский, И. И. (2005). *Жизнь и наука: воспоминания* (с. 256 - 287). Наука.
- Балыхин, М. Г., & Благовещенский, И. Г. (2018). Контроль качества кондитерской продукции с использованием различных способов обработки изображений. В *Современное состояние и перспективы развития упаковки в пищевой промышленности* (с. 82 - 85).
- Балыхин, М. Г., Борзов, А. Б., & Благовещенский, И. Г. (2017). *Методологические основы создания экспертных систем контроля и прогнозирования качества пищевой продукции с использованием интеллектуальных технологий*. Франтера.
- Белоусов, И. Р. (2002). *Формирование уравнений динамики роботов-манипуляторов*. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.
- Белоусов, И. Р., Богуславский, А. А., Емельянов С. Н., Охоцимский, Д. Е., Платонов, А. К., Сазонов, В.В., & Соколов С. М. (1999). *Взаимодействие робота манипулятора с подвижными объектами*. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.
- Белянин, П.Н. (1992). *Кинематические схемы, системы и элементы промышленных роботов*. Машиностроение.
- Белянин, П.Н. (2000). Состояние и развитие техники роботов. *Проблемы машиностроения и надёжность машин*, 2, 85 - 96.
- Благовещенская, М. М. (2009). *Основы стабилизации процессов приготовления многокомпонентных пищевых масс*. Франтера.
- Благовещенская, М. М., Благовещенский, И. Г. & Назойкин, Е. А. (2015). Методика автоматической оценки качества пищевых изделий на основе теории искусственных нейронных сетей. *Пищевая промышленность*, 2, 42 - 45.
- Благовещенская, М. М., & Злобин, Л. А. (2005). *Информационные технологии систем управления технологическими процессами*. Высшая школа.
- Благовещенская, М. М., & Сантон Куннихан, М. П.

- (2017). Структура систем управления дозирования с использованием нейронных сетей. В *Общегуниверситетская студенческая конференция студентов и молодых ученых «День науки»*. (с. 263 – 267).
- Благовещенская М. М., Шаверин А. В., & Благовещенский И. Г. (2012). Автоматизация контроля показателей вкуса шоколадных изделий на основе использования нейронных сетей. *Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья*, 8, 50 – 52.
- Благовещенский, И. Г., Макаровская, З. В., Благовещенская, М. М., Чувахин, С. В., & Митин, В. В. (2019). Использование цифровой видеокамеры в качестве интеллектуального датчика системы автоматического регулирования процесса формирования гранулированных пищевых масс. В *Интеллектуальные системы и технологии в отраслях пищевой промышленности* (с. 71-75).
- Благовещенский, И. Г., & Носенко, С. М. (2015). Экспертная интеллектуальная система мониторинга процесса формирования помадных конфет с использованием системы технического зрения. *Пищевая промышленность*, 6, 32 – 36.
- Гарев, К. В., Благовещенский, И. Г., Назойкин, Е. А., Благовещенский, В. Г., & Макаровская, З. В. (2019). Использование технического зрения в качестве инновационного решения в системах «умного дома». В *Интеллектуальные системы и технологии в отраслях пищевой промышленности* (с. 47 – 52).
- Гончаров, К. А., Благовещенский, И. Г., Назойкин, Е. А., Благовещенский, В. Г., & Макаровская З. В. (2019). Использование библиотеки OPENCV для работы с техническим зрением. В *Интеллектуальные системы и технологии в отраслях пищевой промышленности* (с. 53 – 60).
- Зубов, Д. В. (2017). Программный комплекс для моделирования мехатронного манипулятора. В *Национальный Суперкомпьютерный Форум «НСКФ-2017»* (с. 42 – 46).
- Зубов, Д. В. (2016). Современные проблемы управления технологическими манипуляторами в промышленности. В *Математические методы в технике и технологиях. Машиностроение* (с. 233 – 236).
- Иванов Я. В., Благовещенская М. М., & Благовещенский И. Г. (2012). Автоматизация процесса формирования конфетных масс с использованием датчика цифровой видеокамеры (ЦВК). В *Планирование и обеспечение подготовки и переподготовки кадров для отраслей пищевой промышленности и медицины* (с. 215 – 218).
- Кафаров, В. В., & Макаров, В. В. (1990). *Гибкие автоматизированные производственные системы в химической промышленности*. Химия.
- Кафаров, В. В. (1968). *Методы кибернетики в химии и химической технологии*. Химия.
- Крылова, Л. А., Благовещенский, В. Г., & Татаринцов, А. В. (2017). Разработка интеллектуальных аппаратно- программных комплексов мониторинга процессов сепарирования дисперсных пищевых масс на основе интеллектуальных технологий. В *Развитие пищевой и перерабатывающей промышленности России: кадры и наука* (с. 199 – 201). Издательский комплекс МГУПП.
- Макаров, И. М. (1986). *Робототехника и гибкие автоматизированные производства*. Высшая школа.
- Назойкин, Е. А., Благовещенский, И. Г., Синча, В. М., Жиров, М. В., & Митин, В. В. (2019). Использование имитационного моделирования для идентификации состояния предприятий в пищевой промышленности. В *Интеллектуальные системы и технологии в отраслях пищевой промышленности* (с. 147 – 155).
- Носенко, С. М., Благовещенский, И. Г., Шаверин, А. В., & Благовещенская, М. М. (2014). Автоматизация контроля показателей вкуса шоколадных изделий с использованием интеллектуальных технологий. *Кондитерское и хлебопекарное производство*, 10(153), 56 – 59.
- Петров, А. Ю., Благовещенская, М. М., Благовещенский, В. Г., Ионов, А. В., Благовещенский, И. Г. (2019). Главные принципы при построении системы компьютерного зрения в хлебопекарной промышленности. В *Интеллектуальные системы и технологии в отраслях пищевой промышленности* (с. 121 – 126).
- Петряков, А. Н., Благовещенская, М. М., Благовещенский, В. Г., Митин, В. В., Благовещенский, И. Г. (2019). Повышение качества идентификации и позиционирования объекта на цифровых стерео изображениях при помощи алгоритмов построения карты глубины. В *Интеллектуальные системы и технологии в отраслях пищевой промышленности* (с. 133 – 138).
- Савостин, С. Д., Благовещенская, М. М., Благовещенский, И. Г. (2016). Автоматизация контроля показателей качества муки в процессе размолла с использованием интеллектуальных технологий. Франтера.
- Скопинцев, И.В. (2016). Проектирование системы управления технологическим манипулятором с помощью пакетов LabVIEW и Solid Work. В *Полимерная индустрия: Инновации. Эффективность. Ресурсосбережение. Машиностроение* (с. 57 – 62).
- Филаретов, В. Ф., & Зуев, А. В. (2006). Позиционно-силовое управление электроприводом манипулятора. *Мехатроника, автоматизация, управление*.

- ние, 9, 20-24.
- Шаверин, А. В., Благовещенская, М. М., & Благовещенский, И. Г. (2012). Автоматизация контроля органолептических показателей качества шоколадных изделий. В *Планирование и обеспечение подготовки и переподготовки кадров для отраслей пищевой промышленности и медицины* (с. 209 – 212).
- Эраки, М. Т. Х. (2018). Программный комплекс для решения обратной кинематической задачи робота с тремя вращательными степенями свободы манипулятора. *Естественные и технические науки*, 6, 107–120.
- Эраки, М. Т. Х., & Зубов, Д. В. (2018). Управление и исследование динамики робота-манипулятора с использованием программных пакетов LabVIEW и SolidWorks. *Естественные и технические науки*, 4, 177–183.
- Юревич Е.И. (2005). *Основы робототехники*. Издательство СПбГПУ.
- Alavandar, S., & Nigam, M. J. (2008). Neuro-Fuzzy based Approach for Inverse Kinematics Solution of Industrial Robot Manipulators. *International Journal of Computers, Communications and Control*, 3, 224–234.
- Alcin, O. F. (2016). Extreme learning machine based robotic arm modeling. *International Journal of Robotics Research*, 1160–1163.
- Angeles, J. (1985). On the numerical solution for inverse kinematic problem. *International Journal of Robotics*, 4 (2), 21–37.
- Awcock, G. J. (1995). *Applied Image Processing Hand Book*. Macmillan Press Ltd.
- Baglietto, P. (1996). Image Processing on High-Performance RISC Systems. *Proceedings of the IEEE*, 7, 917–930.
- Benjanarasuth, T., Sowanee, N., & Naksuk, N. (2010). Two-degree-of-freedom simple servo adaptive control for SCARA robot. ICCAS 2010, 480–484. <http://doi.org/10.1109/ICCAS.2010.5669904>
- Bastutchech, C. M. (1989). Techniques for Real-time Generation of Range Images. *Proceedings of the IEEE*, 262–268.
- Brian, H. (2008). What is next for Robotics, Robotic Industries Association. *International Journal of Robotics*, 6(4), 52–57.
- Chaudhary, H., Panwar, V., & Prasad, R. (2014). Adaptive neuro fuzzy based hybrid force/position control for an industrial robot manipulator. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(6), 1299–1308.
- Christe, B. (2009). Robotic Application Research: Past, Present. *International Journal of Robotics*, 3(2), 43–47.
- Craig, J. (2005). *Introduction to Robotics Mechanics and Control (Third Edition)*. Pearson Education.
- Davies, E. R. (1990). *Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities Hand Book*. Academic Press Limited.
- Khalal, O. (2007). Robust control of manipulator robot by using the variable structure control with sliding mode. *International Journal of Computers, Communications and Control*, 5, 1–6.
- Kucuk, S., & Bingul, Z. (2004). The inverse kinematics solutions of industrial robot manipulators. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics*, 274 – 279.
- Raghavan, M., & Roth, B. (1993). Inverse kinematics of the general 6R manipulator and the related linkages. *Publishing House Of Mechanical-TRANS*, 5, 502–508.

Quality Control of Bottling and Labelling Food Products with the use of Intelligent Technologies

Eraki Mohamed Taher Hamed¹, Ivan G. Blagoveshchenskiy²,
Vladislav G. Blagoveshchenskiy², Dmitry V. Zubov³

¹ *Mansoura University, Mansoura City, Egypt*

² *Moscow State University of Food Production*

³ *Moscow Polytechnic University*

Correspondence concerning this article should be addressed to Ivan G. Blagoveshchenskiy, Moscow State University of Food Production, 11 Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russian Federation. E-mail: igblagov@mgupp.ru

The article is devoted to improving the efficiency of the food enterprise by developing and implementing an automated control system for the technological manipulator on the line of filling and labeling of food beverages using intelligent technologies. The article defines the relevance of the topic, provides a literary review of production lines for filling and labeling of food products, and analyzes the work on mathematical modeling of the kinematics and dynamics of machines and aggregates combined in food production lines, taking into account their interaction, their interaction with the environment. The necessity of solving kinematic problems, especially problems of reverse kinematics of the robot manipulator, is shown. The analysis carried out in the work showed that the existing universal algorithms for calculating kinematics are simple to write in General, but due to a number of unavoidable disadvantages of resource consumption and have in some cases a large computational error. If technological manipulators are forced to work in areas where this method leads to significant computational errors, this may slow down the movement of the manipulator, which also leads to a decrease in productivity, or require forced changes to the operating mode in order to remove the working body from the center of the working area, which will take up more space for each manipulator. Therefore, instead of using a universal algorithm for calculating kinematics, it is proposed to use a set of simple trigonometric expressions for the conditions of specific movements, which allows maintaining the required accuracy throughout the entire working area. To control the manipulator, find the optimal trajectory, and interact with the reality model program (in the SolidWorks environment), we used programs created in the LabVIEW environment with NI-SoftMotion tools as a controller for controlling the position of the model. To automate the quality control of filling and labeling of food products and modernize the control system of the technological manipulator, algorithms for solving the inverse kinetic problem for robots such as PUMA, SCARA and KUKA, as well as software that implements the developed algorithms, have been developed. The results of the analysis of the use of the optical product recognition system, which takes into account the joint movement of the manipulator and the products, are shown. As a result of the research, a system of virtual prototyping of the mechatronic system has been developed, which allows selecting the manipulator motion control controller and the required motors and parameters for optimizing the filling line and labeling of food products using intelligent technology. Based on the results obtained, an improved model of the Puma 560 robot has been developed, which includes means for moving the manipulator using intelligent technologies, which will increase the efficiency of the filling line and food labeling, and improve their quality indicators.

Keywords: control, filling quality, labeling, food products, intelligent technologies, management system

References

- Alavandar, S., & Nigam, M. J. (2008). Neuro-Fuzzy based Approach for Inverse Kinematics Solution of Industrial Robot Manipulators. *International Journal of Computers, Communications and Control*, 3, 224–234.
- Alcin, O. F. (2016). Extreme learning machine based robotic arm modeling. *International Journal of Robotics Research*, 1160–1163.

How to Cite

Eraky, M. T. H., Blagoveshchenskiy, I. G., Blagoveshchenskiy, V. G., & Zubov, D. V. (2020). Quality Control of Bottling and Labelling Food Products with the use of Intelligent Technologies. *Health, Food & Biotechnology*, 2(1). <https://doi.org/10.36107/hfb.2020.i1.s295>

- Angeles, J. (1985). On the numerical solution for inverse kinematic problem. *International Journal Robotics*, 4 (2), 21–37.
- Awcock, G. J. (1995). *Applied Image Processing Hand Book*. Macmillan Press Ltd.
- Baglietto, P. (1996). Image Processing on High-Performance RISC Systems. *Proceedings of the IEEE*, 7, 917–930.
- Balykhin, M. G., & Blagoveshchenskiy, I. G. (2018). Quality control of confectionery products using various image processing methods. In *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya upakovki v pishchevoj promyshlennosti* [Current status and development prospects of packaging in the food industry], (pp. 82 – 85).
- Balykhin, M. G., Borzov, A. B., & Blagoveshchenskiy, I. G. (2017). *Metodologicheskie osnovy sozdaniya ekspertnykh sistem kontrolya i prognozirovaniya kachestva pishchevoj produkcii s ispol'zovaniem intellektual'nykh tekhnologiy* [Methodological foundations of creating expert systems for monitoring and forecasting the quality of food products using intelligent technologies]. Izdatel'stvo Frantera.
- Bastuche, C. M. (1989). Techniques for Real-time Generation of Range Images. *Proceedings of the IEEE*, 262–268.
- Belousov, I. R. (2002). *Formirovanie uravneniy dinamiki robotov-manipulyatorov* [Formation of dynamics equations for robotic manipulators]. Institut prikladnoy matematiki im. M.V. Keldysha RAN.
- Belousov, I. R., Boguslavsky, A. A., Emelyanov, S. N., Okhotsimsky, D. E., Platonov, A. K., Sazonov, V. V., Sokolov, S. M. (1999). *Vzaimodeystvie robota manipulyatora s podvizhnymi ob'ektami* [Interaction of a robotic manipulator with moving objects]. Institut prikladnoy matematiki im. M.V. Keldysha RAN.
- Belyanin, P. N. (1992). *Kinematicheskie skhemy, sistemy i elementy promyshlennykh robotov* [Kinematic schemes, systems and elements of industrial robots]. Mashinostroyeniye.
- Belyanin, P. N. (2000). State and development of robot technology. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnost' mashin*. RAS [Engineering problems and machine reliability. RAS], 2, 85 - 96.
- Benjanarasuth, T., Sowanee, N., & Naksuk, N. (2010). Two-degree-of-freedom simple servo adaptive control for SCARA robot. ICCAS 2010, 480–484. <http://doi.org/10.1109/ICCAS.2010.5669904>
- Blagoveshchenskaya, M. M. (2009). *Osnovy stabilizatsii processov prigotovleniya mnogokomponentnykh pishchevyykh mass* [Basics of stabilization of the preparation of multicomponent masses]. Izdatel'stvo Frantera.
- Blagoveshchenskaya, M. M., Blagoveshchenskiy, I. G., & Nazoykin E. A. (2015). The technique of automatic assessment of the quality of food products based on the theory of artificial neural networks. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food Industry], 2, 42 - 45.
- Blagoveshchenskaya, M. M., & Zlobin, L. A. (2005). *Informatsionnye tekhnologii sistem upravleniya tekhnologicheskimi processami* [Information technology of process control systems]. Izdatel'stvo Vysshaya shkola.
- Blagoveshchenskaya, M. M., & Santon Kunnikhan, M. P. (2017). The structure of dosing control systems using neural networks. In *Obshcheuniversitetskaya studencheskaya konferentsiya studentov i molodykh uchennykh «Den' nauki»* [University Conference of Students and Young Scientists “Science Day”] (s. 263 – 267).
- Blagoveshchenskaya, M. M., Shaverin, A. V., & Blagoveshchenskiy, I. G. (2012). Automation of control of taste indicators of chocolate products based on the use of neural networks. *Khraneniye i pererabotka sel'skokhozyaystvennogo syr'ya* [Storage and processing of agricultural raw materials], 8, 50 - 52.
- Blagoveshchenskiy, I. G., Makarovskaya, Z. V., Blagoveshchenskaya, M. M., Chuvakhin, S. V., & Mitin, V. V. (2019). Using a digital video camera as an intelligent sensor of an automatic control system for the molding of granular food masses. In *Intellektual'nye sistemy i tekhnologii v otraslyah pishchevoj promyshlennosti* [Intelligent systems and technologies in food industries] (s. 71–75).
- Blagoveshchenskiy, I. G., Nosenko S.M. (2015). Expert intellectual system for monitoring the process of molding fondant sweets using the vision system. *Food Industry* [Pishchevaya promyshlennost'], 6, 32 - 36.
- Brian, H. (2008). What is next for Robotics, Robotic Industries Association. *International Journal Robotics*, 6(4), 52–57.
- Chaudhary, H., Panwar, V., & Prasad, R. (2014). Adaptive neuro fuzzy based hybrid force/position control for an industrial robot manipulator. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(6), 1299–1308.
- Christe, B. (2009). Robotic Application Research: Past, Present. *International Journal Robotics*, 3(2), 43–47.
- Craig, J. (2005). *Introduction to Robotics Mechanics and Control (Third Edition)*. Pearson Education.
- Davies, E. R. (1990). *Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities Hand Book*. Academic Press Limited.
- Garev, K. V., Blagoveshchenskiy, I. G., Nazoykin, E. A., Blagoveshchenskiy, V. G., & Makarovskaya, Z. V. (2019). Using technical vision as an innovative solution in smart home systems. In *Intellektual'nye sistemy i tekhnologii v otraslyah pishchevoj promyshlennosti* [Intelligent systems

- and technologies in the food industry] (s.47-52).
- Goncharov, K. A., Blagoveshchensky, I. G., Nazoykin, E. A., Blagoveshchensky, V. G., & Makarovskaya, Z. V. (2019). Using the OPENCV library for working with technical vision. In *Intellektual'nye sistemy i tekhnologii v otraslyah pishchevoj promyshlennosti* [Intelligent systems and technologies in the food industry] (s. 53 – 60).
- Zubov, D. V. (2017). A software package for modeling a mechatronic manipulator. In *Nacional'nyj Superkomp'yuternyj Forum «NSKF-2017»* [Nacional'nyj Superkomp'yuternyj Forum "NSKF-2017"] (s. 42-46).
- Zubov, D. V. (2016). Modern problems of controlling technological manipulators in industry. In *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah. Mashinostroenie* [Mathematical methods in engineering and technology. Mechanical Engineering] (s. 233 – 236).
- Ivanov, Y. V., Blagoveshchenskaya, M. M., & Blagoveshchenskiy, I. G. (2012). Automation of the process of molding candy masses using a digital video camera (CVC) sensor. In *Planirovanie i obespechenie podgotovki i perepodgotovki kadrov dlya otraslej pishchevoj promyshlennosti i mediciny* [Planning and providing training and retraining of personnel for the food industry and medicine] (s. 215 – 218).
- Kafarov, V. V., & Makarov, V. V. (1990). *Gibkie avtomatizirovannye proizvodstvennyye sistemy v himicheskoy promyshlennosti*. [Flexible automated manufacturing systems in the chemical industry]. Khimiya.
- Kafarov, V. V. (1968). *Metody kibernetiki v himii i himicheskoy tekhnologii* [Cybernetics methods in chemistry and chemical technology]. Khimiya.
- Khalal, O. (2007). Robust control of manipulator robot by using the variable structure control with sliding mode. *International Journal of Computers, Communications and Control*, 5, 1–6.
- Krylova, L. A., Blagoveshchenskiy, V. G., & Tatarinov, A. V. (2017). Development of intelligent hardware and software systems for monitoring the separation of dispersed food masses based on intelligent technologies. In *Razvitie pishchevoj i pererabatyvayushchej promyshlennosti Rossii: kadry i nauka* [The Development of the Food and Processing Industry of Russia: Personnel and Science] (pp. 199 – 201). Izdatel'skiy kompleks MGUPP.
- Kucuk, S., & Bingul, Z. (2004). The inverse kinematics solutions of industrial robot manipulators. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics*, 274 – 279.
- Makarov I.M. (1986). *Robotics and flexible automated production* (pp. 320 – 375). Izdatel'stvo Vysshaya shkola [High school publishing house].
- Nazoykin E.A., Blagoveshchenskiy I.G., Sincha V.M., Zhiron M.V., Mitin V.V. (2019). The use of simulation to identify the state of enterprises in the food industry. In *the collection: Intelligent systems and technologies in the food industry industries Conference proceedings* (pp. 147 – 155). Izdatel'skiy kompleks MGUPP [Publishing complex MGUPP].
- Nosenko, S. M., Blagoveshchenskiy, I. G., Shaverin, A. V., & Blagoveshchenskaya, M. M. (2014). Automation of control of taste indicators of chocolate products using intelligent technologies. *Konditerskoye i khlebopekarnoye proizvodstvo* [Confectionery and bakery production], 10(153), 56 – 59.
- Petrov, A. Yu., Blagoveshchenskaya, M. M., Blagoveshchenskiy, V. G., Ionov, A. V., & Blagoveshchenskiy, I. G. (2019). The main principles in building a computer vision system in the baking industry. In *Intellektual'nye sistemy i tekhnologii v otraslyah pishchevoj promyshlennosti* [Intelligent systems and technologies in the food industry] (pp. 121 – 126).
- Petryakov, A. N., Blagoveshchenskaya, M. M., Blagoveshchenskiy, V. G., Mitin, V. V., Blagoveshchenskiy, I. G. (2019). Improving the quality of identification and positioning of an object in digital stereo images using depth mapping algorithms. In *Intellektual'nye sistemy i tekhnologii v otraslyah pishchevoj promyshlennosti* [Intelligent systems and technologies in the food industry] (pp. 133 – 138).
- Raghavan, M., & Roth, B. (1993). Inverse kinematics of the general 6R manipulator and the related linkages. *Publishing House Of Mechanical-TRANS*, 5, 502–508.
- Savostin, S. D., Blagoveshchenskaya, M. M., & Blagoveshchenskiy, I. G. (2016). *Avtomatizatsiya kontrolya pokazatelej kachestva muki v processe razmola s ispol'zovaniem intellektual'nyh tekhnologij* [Automation of control of flour quality indicators during grinding using intelligent technologies]. Frantera.
- Skopintsev, I. V. (2016). Designing a control system for a technological manipulator using LabVIEW and Solid Work packages. In *Polimernaya industriya: Innovacii. Effektivnost'. Resursosberezhenie. Mashinostroenie* [Polymer industry: Innovation. Efficiency. Resource Saving. Engineering] (pp. 57 – 62).
- Filaretov, V. F., & Zuev, A. V. (2006). Positional-force control of the manipulator electric drive. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, Automation, Control], 9, 20-24.
- Shaverin, A. V., Blagoveshchenskaya, M. M., &

- Blagoveshchenskiy, I. G. (2012). Automation of the control of organoleptic quality indicators of chocolate products. In *Planirovanie i obespechenie podgotovki i perepodgotovki kadrov dlya otraslej pishchevoj promyshlennosti i mediciny* [Planning and providing training and retraining of personnel for the food industry and medicine] (pp. 209 – 212).
- Eraki, M. T. H. (2018). A software package for solving the inverse kinematic problem of a robot with three rotational degrees of freedom of the manipulator. *Zhurnal «Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki»* [The journal «Natural and technical sciences»], 6, 107–120.
- Eraki, M. T. H., & Zubov, D. V. (2018). Management and research of the dynamics of the robotic arm using LabVIEW and SolidWorks software packages. *Zhurnal «Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki»* [The journal «Natural and technical sciences»], 4, 177–183.
- Yurevich, E. I. (2005). *Osnovy robototekhniki* [Fundamentals of Robotics] (pp. 85 – 126). Izdatel'stvo SpbGPU.