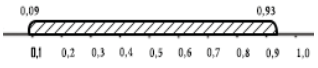
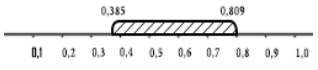
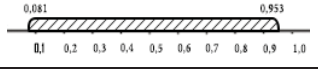


В табл. 4 сопоставлены результаты расчета размерной цепи спускового механизма пистолета ПСМ, полученные вручную аналитическим методом, в системе CETOL 6σ и по предлагаемому методу. При этом стоит отметить, что ручной расчет данной размерной цепи, проведенный сотрудниками завода в далеком 1982 г., содержит ошибки, свя-

занные с несовершенством расчетного метода, предполагающего, что передаточные отношения звеньев цепи неизменны. Для ручного расчета данных по времени расчета нет, но эту величину можно косвенно оценивать по количеству страниц рукописного расчета, который занимает 9 страниц формата А4.

Таблица 4. Сводная таблица результатов расчета разными методами

Метод (система)	Результат расчета	Допуск	Изображение допуска	Ошибка	Время расчета
Ручной расчет	[0,0902; 0,9343]	0,84		4%	–
Cetol 7 Метод системных моментов (расчет по 1-й производной)	[0,385149; 0,809035]	0,42		51%	25 сек.
Предлагаемый метод	[0,081104583558; 0,953068767541]	0,87		–	22 сек.

Таким образом, применение современных интервальных численных методов оптимизации для задачи расчета размерных цепей в общей оптимизационной постановке позволяет качественно решать реальные сложные задачи расчета РЦ с переменными передаточными отношениями с высокой гарантированной наперед заданной точностью за вполне приемлемое время.

Библиографические ссылки

1. РД 50-635-87. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей : метод. указ. – М., 1987. – 46 с.

2. Цепи размерные. Методика расчета плоских размерных цепей при переменных передаточных отношениях :

Получено 31.01.2017

метод. рекомендации МР 35-82. – М. : ВНИИИзмаш, 1982. – 182 с.

3. Кадацкая М. С. Размерное моделирование функционирования составных частей и деталей машин : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. – Ижевск, 1996. – 113 с.

4. Достоверные вычисления. Базовые численные методы / У. Кулиш, Д. Рац, Р. Хаммер, М. Хокс ; пер. с англ. – М. ; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2005. – 496 с.

5. Прикладной интервальный анализ / Л. Жолен, М. Кифер, О. Дидри, Э. Вальтер ; пер. с англ. – М. ; Ижевск : Ин-т компьютерных иссл., 2005. – 468 с.

6. Достоверные вычисления. Базовые численные методы.

7. Ермилов В. В. Вариационное параметрическое геометрическое моделирование в САПР на основе онтологий : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.12. – Ижевск, 2008. – 178 с.

УДК 519.248

М. А. Аль Аккад, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ПРОБЛЕМНО ОРИЕНТИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЗАХВАТОМ ОБЪЕКТОВ МАНИПУЛЯТОРОМ ЧЕЛОВЕКООДОБНОГО РОБОТА

Введение

Сегодня цель исследований, направленных на разработку двуруких роботов, состоит в том, чтобы сделать их настоящими партнерами человека в различных сферах, включающих космические исследования, помощь инвалидам, производство и др. При этом необходимо обеспечить возможность манипуляций различными инструментами, такими как медицинские инструменты и устройства промышленного назначения. В данном контексте решение задачи координации и управления манипуляторами робота становится одной из

приоритетных задач различных научных исследований.

Использование двух манипуляторов робота в режиме дистанционного управления исследовано в работе Дж. Тейлор и Д. Сьюард [1] в ситуации, когда оператор выполняет бимануальные задачи, которые могут передаваться двум управляемым рукам робота на расстоянии. Для манипуляций, ориентированных на цель, две руки физически не взаимодействуют друг с другом, но обе решают одну и ту же задачу (например, нажатие различных клавиш на клавиатуре). В исследовании Д. Сурдиловича и др.

бимануальная манипуляция определяется как физическое взаимодействие с одним и тем же объектом [2]. При этом в случае несогласованной манипуляции две руки выполняют две различные задачи; при согласованной манипуляции руки робота выполняют разные части одной и той же задачи (манипуляции, ориентированные на цель, и бимануальные манипуляции). Первое определение выделяет системы, которые могут состоять из двух отдельных манипуляторов, выполняющих задачи независимо друг от друга. Так как в данном случае явная координация отсутствует, нет принципиальной разницы по сравнению с системой с одним манипулятором, и анализ не должен отличаться от условий работы с одним манипулятором. Каккавале Ф. и др. выделяют два случая, учитывающие различные пространственные и временные аспекты координации в системах с одним манипулятором [3]. Т. Вимбок и др. [4, 5] и А. Кавамура и др. [6] выделяют две категории управления манипуляторами. К первой относится управление двумя манипуляторами с установленными захватами, ко второй – манипуляции объектом при помощи пальцев. В исследованиях М. Т. Сиокарле и П. К. Аллена [7], М. Габичини и А. Бичи [8], посвященных синтезу захвата, предложена концепция синергии положений или подпространства конфигурации руки, подразумевающая малоприводные системы взаимодействующих манипуляторов. В работах М. Белла [9] изучен стабильный захват деформируемых объектов, основанный на концепции ограниченного силового замыкания, и описано применение предлагаемого метода для линейных деформируемых объектов. Также описано использование позиционной системы технического зрения для управления двумя манипуляторами робота и встроенных в захватное устройство на каждой руке камер, использующихся для корректировки положения деталей в каждой руке и выполнения задачи сборки. Е. Грибовская и А. Биллард [10] предлагают концепцию программирования двух манипуляторов путем демонстрации. Действия двух манипуляторов классифицируются на основе пространственных отношений между траекториями рук, выполняющих согласованные действия. В. С. Чанг и В. Т. Нгуен [11] рассматривают сценарий взаимодействия между двумя независимыми мобильными роботами с двумя манипуляторами (6 степеней свободы), которые захватывают и перемещают коробку к целевой позиции при помощи визуальной оценки положения роботов и коробки.

Исследованию кинематики и синтезу управления двумя манипуляторами посвящено немало работ отечественных ученых [12–14]. И. А. Орлов, Е. В. Корягин рассматривают работу робота с одним предметом в двумерной плоскости, при этом конечности робота не являются антропоморфными [15, 16].

В исследованиях А. Г. Лескова и др. приводятся результаты экспериментальных исследований алгоритмов управления движением двуруких роботов при наличии механической связи между руками. При этом рассмотрены случаи, когда алгоритмы основа-

ны как на задании общей плановой траектории движения, так и на задании траектории только для ведущей руки (вторая рука при этом движется в податливом режиме) [17].

Таким образом, анализ существующих технологий и методов показывает, что в основном используется бимануальное функционирование двух отдельных манипуляторов, которые не рассматриваются как одно целое; кроме того, управление основано на системе технического зрения. В данной работе два манипулятора робота рассматриваются как одно целое, и система технического зрения используется не для всех, а лишь для некоторых задач, так как мы считаем, что некоторые задачи являются систематическими и не требуют работы с визуальными данными и быть выполнены на основе тактильного восприятия. С учетом всего вышесказанного целью данной работы является *снижение сложности* процесса управления рукой робота за счет сокращения степеней свободы и *реализация объектно ориентированного управления*, рассматривающего две руки робота как единое целое.

Алгоритм проблемно ориентированного захвата

Захват объекта начинается с распознавания его трехмерной модели по значениям яркости изображения, следующий шаг [18] – определение сил и крутящих моментов. Выделяют два вида координации: предварительная координация – до начала выполнения задания с использованием заранее определенных правил, и координация в реальном времени – в процессе выполнения задания. На рис. 1 показан алгоритм проблемно ориентированного захвата.



Рис. 1. Алгоритм проблемно ориентированного захвата

Руки робота взаимодействуют между собой так, чтобы по очереди выполнять определенные действия на каждом временном интервале для предотвращения столкновений друг с другом. Когда выявляется опасность взаимоблокировки, используется алгоритм, основанный на теории графов, и планируется

альтернативная траектория, позволяющая избежать столкновения.

Так как выборка вдоль поверхности является равномерной, кривизна прямо пропорциональна углам ориентации (рис. 2).

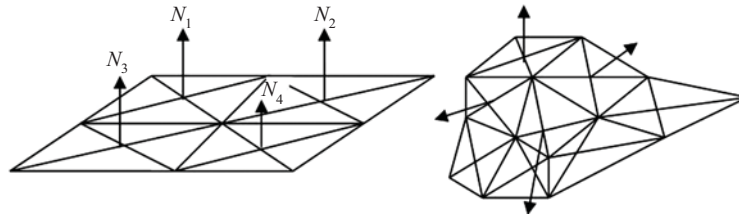


Рис. 2. Элементы сегментов поверхности объекта

На трехмерную модель наносятся сетки в вертикальном и горизонтальном направлениях, измеряется разница между соседними углами в этих направлениях. Строится карта дальности, используемая системой технического зрения, которая на основе яркости точек поверхности объекта строит сплайн-функцию. Используется градиент углов ориентации трехмерной модели α , вычисленный для узлов модели. Градиент угла α (где α – углы ориентации 3-мерной модели, рассчитанные для узлов модели) в основном направлении пропорционален основной кривизне в этом направлении: $\alpha_{\max} \sim k_{\max}$, $\alpha_{\min} \sim k_{\min}$.

Усредненная форма захвата $r_0(\alpha, t)$ является усредненной формой захватов в первоначальной базе данных, тогда любая форма захвата $r(\alpha, t)$ является преобразованием усредненной формы, а $\rho(\alpha, t)$ – изменения, которые отражают особенности данного захвата ($\rho/r_0 < 1$):

$$r(\alpha, t) = r_0(\alpha, t) + \rho(\alpha, t)/r_0 = 1/Nr^k(\alpha, t),$$

$$\rho = a_i \psi_i(\alpha, t),$$

где ψ_i – направление вектора движения; a_i – вектор углов сочленения при захвате; t – время.

Для коррекции позы подходит представление модели переменной шириной пульса (ПШП) (рис. 3), при этом мы можем прибавлять и вычитать три угла вращения к матрицам ПШП, чтобы получить их скорректированную версию.

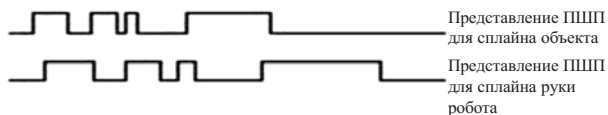


Рис. 3. Представление ПШП для кривых объекта и руки

Для каждого нового объекта робот производит адаптацию контактных точек известного объекта. Таким образом, проблемно ориентированный алгоритм реализует процесс адаптации формы путем вычисле-

ния изменений исходной формы, которые требуются для достижения желаемой формы, методом подбора и сопоставления множества точек поверхности и пар локальных нормалей исходной и желаемой форм.

Алгоритм извлечения параметров трехмерной модели, который является частью проблемно ориентированного алгоритма

Шаг 1. Рассчитаем $\Delta\alpha_1 = \alpha_1 - \alpha_2$, $\Delta\alpha_2 = \alpha_1 - \alpha_3$, $\Delta\alpha_3 = \alpha_3 - \alpha_4$, $\Delta\alpha_4 = \alpha_2 - \alpha_4$.

Если $\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2 = \Delta\alpha_3 = \Delta\alpha_4 = 0$ – участок плоский;

если $\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2 = \Delta\alpha_3 = \Delta\alpha_4 \neq 0$ – участок шарообразный;

если $\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2 \neq 0$ и $\Delta\alpha_3 = \Delta\alpha_4 = 0$ – участок цилиндрический в одном основном направлении;

если $\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2 = 0$ и $\Delta\alpha_3 = \Delta\alpha_4 \neq 0$ – участок цилиндрический во втором основном направлении.

Шаг 2. Рассчитаем нормали узлов трехмерной модели объекта.

Шаг 3. Рассчитаем углы наклона нормалей.

Шаг 4. Рассчитаем $\alpha_{\max} = \alpha_1 - \alpha_2$, $\alpha_{\min} = \alpha_1 - \alpha_3$.

Поиск соответствия можно сформулировать как задачу оптимального выбора, где $\{x_1, \dots, x_N\}$ – точки исходной формы, преобразованные таким образом, чтобы соответствовать конечной форме $\{y_1, \dots, y_N\}$. Назначение точек исходного состояния i для точек конечного состояния j осуществляется через матрицу назначений a_{ij} . Соответствие точек интерполируется для получения непрерывного (возможно, негладкого) соответствия точек исходного и желаемого объектов.

Сравнение проводится по циклическому методу сопоставления объекта (ЦСО). По данному методу рассчитывается ошибка $\Delta\alpha$, $\Delta\alpha = 0$, при выполнении условия совпадения найдено. Объект представляется следующим образом: значения векторов полигонов трехмерной модели преобразуются в величины ширины пульса (рис. 3) по методу ПШП.

Алгоритм поиска охватываемого объекта

Шаг 1. Рассчитать матрицу назначений:

$a_{ij} = 1$, если i назначается для j ,
0 – в противном случае.

Рассчитать $d_{ij} = \|x_i - y_j\|$ – евклидово расстояние между исходными и конечными точками – и рассчитать $c_{ij} = n_i m_j$ – косинусы углов между единичными векторами нормалей n_i и m_j в исходной точке i и конечной точке j соответственно.

Шаг 2. Минимизировать сумму расстояний между соответствиями, т. е. взаимно назначенными точками:

$$D(a_{11}, \dots, a_{1N}, a_{21}, \dots, a_{NN}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_{ij} a_{ij}. \quad (1)$$

Принимая во внимание ограничения,

$$\sum_{i=1}^N a_{ij} = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, N\}, \quad (2)$$

т. е. назначаем каждую конечную точку для единственной исходной точки;

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} = 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}, \quad (3)$$

т. е. назначаем каждую исходную точку для единственной конечной точки

$$c_{ij} a_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in \{1, \dots, N\}. \quad (4)$$

Шаг 3. Минимизировать

$$\begin{aligned} C(a_{01}, \dots, a_{0N}, a_{10}, \dots, a_{NN}) = \\ = D(a_{11}, \dots, a_{1N}, a_{21}, \dots, a_{NN}) + \\ + \sum_{i=1}^N d_{i0} a_{i0} + \sum_{j=1}^N d_{0j} a_{0j}. \end{aligned} \quad (5)$$

Эксперимент и результаты

В базе данных для каждого изображения сохраняется структура данных трехмерной модели, которая состоит из координат узлов и значений векторов нормалей. После получения нового изображения для идентификации строится его трехмерная модель и карта векторов. Как показано выше, модель строится после корректировки ракурса изображения. Полученная модель сравнивается с имеющимися в базе данных.

Жесты могут быть классифицированы как призматические и круговые независимо от силы или точности захвата. Круговой захват предполагает сильную связь между суставами пальцев.

На рис. 4 представлены результаты эксперимента, отражающие точность захвата по углу ориентации объекта и яркости.

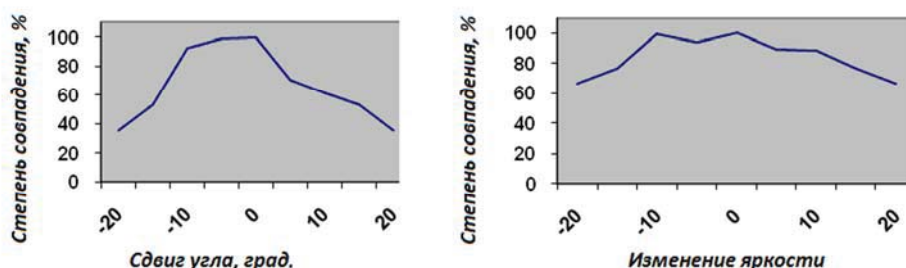


Рис. 4. Точность захвата на основе метода определения угла ориентации и изменения яркости

Заключение

Для достижения адаптируемого и стабильного захвата может быть использован проблемно ориентированный алгоритм. Численные эксперименты показывают, что проблемно ориентированный алгоритм, использующий угол наклона нормали, предлагает достаточно быстрое и точное решение для широкого спектра применений. Ведется дальнейшая работа над совершенствованием интегрированного управления и балансировки руки и кисти, а также двумя руками сразу.

Библиографические ссылки

1. Taylor J., Seward D. Control of a dualarm robotic manipulator // Nuclear Engineering International. – 2010. – Т. 55, № 673. – С. 24–26.
2. Compliance control with dual-arm humanoid robots : Design, planning and programming / D. Surdilovic, Y. Yakut, T. M. Nguyen, X. Pham, A. Vick and R. Martin // IEEE International Conference on Humanoid Robots : сб. ст. междунар. конф., 2010. – С. 275–281.
3. Six-dof impedance control of dual-arm cooperative manipulators / F. Caccavale, P. Chiacchio, A. Marino and L. Vil-

lani // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics : сб. ст. междунар. конф., 2008. – Т. 13, № 5. – С. 576–586.

4. Comparison of object-level grasp controllers for dynamic dexterous manipulation / T. Wimbock, C. Ott, A. Albu-Schäfler and G. Hirzinger // The International Journal of Robotics Research. – 2012. – Т. 31, № 1. – С. 3–23.

5. Dual-arm manipulation / T. Wimbock, C. Ott, E. Prassler, M. Zollner, R. Bischo, W. Burgard, R. Haschke, M. Hagele, G. Lawitzky, B. Nebel, P. Ploger, U. Reiser // Towards Service Robots for Everyday Environments, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics. – Eds. Springer Berlin, Heidelberg, 2012. – Т. 76. – С. 353–366.

6. Simple orientation control of an object by re-grasping using a dual-arm manipulator with multi-fingered hands / A. Kawamura, K. Tahara, R. Kurazume, T. Hasegawa // International Conference on Advanced Robotics : сб. ст. междунар. конф., 2009. – С. 1–6.

7. Ciocarlie M. T., Allen P. K. Hand posture subspaces for dexterous robotic grasping // The International Journal of Robotics Research. – 2009. – Т. 28, № 7. – С. 851–867.

8. On the role of hand synergies in the optimal choice of grasping forces / Gabbicini M., Bicchi A., D. Prattichizzo, M. Malvezzi // Autonomous Robots. – Springer. – 2011. – С. 235–252.

9. Bell M. Flexible Object Manipulation : дис. ... канд. тех. наук. – Университет Дартмута, 2010.

10. *Gribovskaya E., Billard A.* Combining dynamical systems control and programming by demonstration for teaching discrete bimanual coordination tasks to a humanoid robot // 3 IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction : сб. ст. междунар. конференции (Амстердам, 2008). – Амстердам, 2008. – С. 33–40.

11. *Chang W. C., Nguyen V. T.* Control of cooperative dual-arm mobile robots in a vision-based intelligent space // International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines : сб. ст. междунар. конф., 2010. – С. 296–304.

12. *Лесков А. Г., Калеватых И. А.* Экспериментальные исследования алгоритмов управления связанным движением двурукого манипуляционного робота // Вестник МГТУ

им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2012. – № 4(89). – С. 33–43.

13. *Орлов И. А.* Синтез движения манипуляционных систем для пространств со сложными связями и ограничениями : дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Ин-т прикладной математики имени М. В. Келдыша. – М., 2013.

14. *Корягин Е. В.* Разработка высокоуровневой системы управления антропоморфным роботом // Нейроинформатика. – 2013. – Т. 7, № 1.

15. Там же.

16. Там же.

17. *Орлов И. А.* Указ. соч.

18. *Automated Systems of Image Verification* : монография / Е. Pivarciova, P. Bojek, M. A. Al Akkad, B. A. Yakovlevich. – Gliwice, Poland : PA NOVA, 2015. – С. 130–206.

Получено 06.02.2017

УДК 539.217:691.327.333

К. Л. Домнина, Воткинский филиал ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

М. Н. Каракулов, доктор технических наук, доцент, Воткинский филиал ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ОСНОВЫ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Постоянное совершенствование традиционных и внедрение новых технологий производства требует привлечения новых эффективных материалов, свойства которых в большинстве своем необходимо оптимизировать под каждую конкретную задачу. В свою очередь, результаты экспериментов по оптимизации составов материалов известными методами требуют проверки и корректировки, что предполагает выполнение трудоемких исследований. В связи с этим приобрело чрезвычайную актуальность предварительное моделирование составов и их свойств [1].

Задачи создания пористых материалов с заданными свойствами для несущих высокую нагрузку конструкций связаны с неопределенностями [2]. Это, во-первых, неопределенность в оценке эффективности решений; во-вторых, неопределенность условий, в которых предстоит функционировать конструкциям в реальности; и, в-третьих, неопределенность задач, которых, как правило, несколько. Например, надежность и долговечность, минимальная теплопроводность и плотность самого материала, наименьшая трудоемкость изготовления и себестоимость и т. д. Очевидно, что эти задачи необходимо выполнить одновременно. Каждая из них оценивается своими критериями или показателями эффективности, значения которых зависят от значений параметров материала – механических и пластических характеристик, системы армирования (при наличии) и т. д.

Наша цель – построить математические модели этих зависимостей и на их базе формализовать задачу поиска оптимального решения уже для конкрет-

ных случаев. Нами предлагается метод построения критерия теплопроводности пористого материала на примере пенобетона неавтоклавно твердения.

В связи с ужесточением требований по теплозащите зданий и сооружений заметно возрос спрос на качественные теплоизоляционные материалы, эффективность которых оценивается коэффициентом теплопроводности λ . Коэффициент теплопроводности λ является физическим параметром вещества, прямо пропорциональным потоку тепла q через материал и обратно пропорциональным градиенту температур ∇T . В общем случае для вывода дифференциального уравнения теплопроводности используется метод математической физики, когда процесс изучается в элементарном объеме dV за бесконечно малый промежуток времени dt , что позволяет упростить вывод. В общем виде дифференциальное уравнение теплопроводности, записанное в декартовой системе координат, имеет следующий вид [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q_w}{c\rho}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; ρ – средняя плотность; c – удельная теплоемкость; Q_w – мощность внутренних источников тепловыделения, $Q_w = f(x, y, z, t, T)$.

Если для материала $\lambda = \text{const}$, то можно ввести в рассмотрение обозначение коэффициента теплопроводности $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ и оператора Лапласа