

Математическое и компьютерное моделирование

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 681.516.312

doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-35-40

ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, ВКЛЮЧАЮЩИХ КОНТУР ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО УСИЛИЮ

Иван Александрович Брич¹, Сергей Александрович Шептунов²

^{1,2} Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук,
г. Москва, Россия

¹ britch.ivan@yandex.ru

² ship@ikti.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы силомоментного оцувствления в полуавтоматических системах. Описаны основные принципы управления в эргатических системах с точки зрения теории автоматического управления. Рассмотрен метод повышения качества управления путем введение дополнительных обратных связей для оператора. В качестве наиболее перспективного канала обратной связи для внедрения предложено силомоментное оцувствление. Описана актуальность данного канала в реализованных системах автоматического управления, приведены примеры. Приведено описание контура обратной связи по усилиям на рабочем органе манипулятора. В качестве основных проблем при реализации рассматриваемых полуавтоматических систем выделены: влияние кинематической цепи, фильтрация и запаздывание, компенсация силы тяжести, а также проблема контура естественной обратной связи.

Ключевые слова: эргатические системы, системы человек-машина, полуавтоматическое управление, силомоментное оцувствление, обратная связь по усилию, интуитивность управления

Для цитирования: Брич И.А., Шептунов С.А. Проблемы реализации систем полуавтоматического управления, включающих контур обратной связи по усилию // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №3 (25). С. 35-40. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-35-40.

Original article

Open Access Article

PROBLEMS OF IMPLEMENTING SEMI-AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS INCLUDING A FORCE FEEDBACK LOOP

Ivan A. Brich¹, Sergey A. Sheptunov²

^{1,2} Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russia

¹ britch.ivan@yandex.ru

² ship@ikti.ru

Abstract. The issues of force-torque sensing in semi-automatic systems are considered. The paper describes the main control principles in ergatic systems from the viewpoint of automatic control theory, considers a method for improving the control quality by introducing additional feedback for the operator. The work proposes force-torque sensing as the most promising feedback channel for the implementation, describes the relevance of this channel in the fulfilled automatic control systems, gives examples. A description of the feedback loop for the efforts on the manipulator's working element is given. The work highlights the following as the main problems in implementing the considered semi-automatic systems: the kinematic chain influence, filtering and delay, gravity compensation, as well as the problem of the natural feedback loop.

Keywords: ergatic systems, man-machine systems, semi-automatic control, force-torque sensing, force feedback, intuitiveness of control

For citation: Brich I.A., Sheptunov S.A. Problems of Implementing Semi-Automatic Control Systems Including a Force Feedback Loop. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 3 (25). pp. 35-40. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-35-40.

Введение

Автоматизация производства является одним из наиболее быстроразвивающихся направлений человеческой деятельности. Ежедневно, встречаясь с новыми вызовами, индустрия промышленных автоматизированных систем постоянно развивается с момента своего формирования.

Однако не все процессы могут быть целиком автоматизированы. Причиной для этого являются различные факторы: недостаточная безопасность полностью автоматического процесса, невозможность заранее учесть все сценарии развития тех или иных событий, недостаточная гибкость в принятии решений. Примерами таких областей могут послужить атомная энергетика и проведение хирургических операций. Ответом на этот инженерный вызов стало появление полуавтоматических систем.

Управление в полуавтоматических системах

Полуавтоматический комплекс включает в состав своей системы управления не только технические средства, но и человека (оператора) [1]. Внедрение человека в техническую систему позволяет расширить способности к принятию нестандартных решений, реакций на нестандартные обстоятельства, расширяя спектр ее возможных применений. В то же время техническая система расширяет возможности самого человека повышая его силовые и скоростные характеристики. Эргатическая система также позволяет, при необходимости, избегать нахождения людей в опасной для жизни и здоровья области.

Основной идеей построения полуавтоматической системы является синтез человека и системы автоматического управления. Это порождает центральный вектор развития таких систем – углубление интеграции при взаимодействии эргатической системы и оператора [2]. При рассмотрении полуавтоматической системы с точки зрения теории автоматического управления можно отметить, что оператор выполняет функции генератора задающего сигнала, сумматора и регулятора внешнего контура управления (рис. 1).

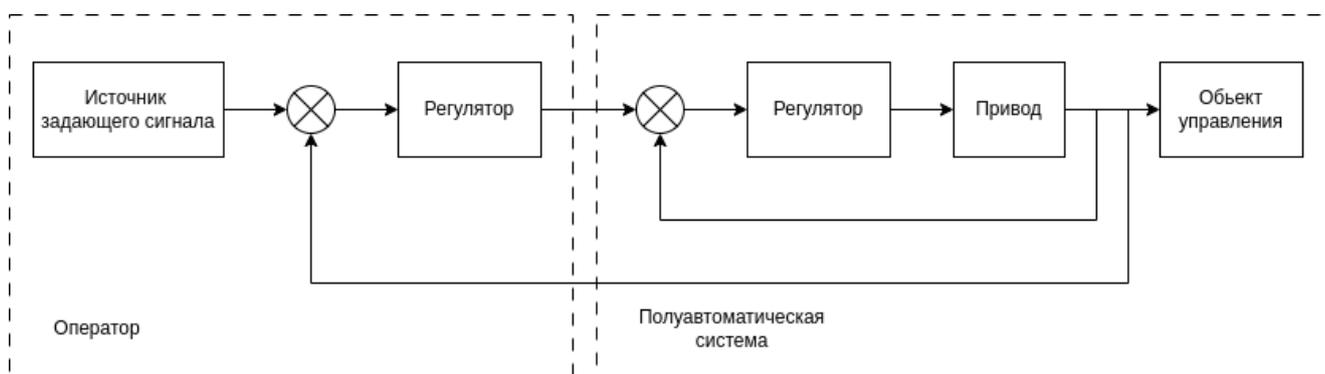


Рис. 1. Схема полуавтоматической системы управления под управлением оператора

Fig. 1. Diagram of a semi-automatic control system under operator control

На представленной выше схеме также видно, что точками пересечения человека и системы являются каналы входных и выходных данных, поэтому совершенствование взаимодействия должно концентрироваться на улучшении этих двух каналов. В данной статье рассматривается вопрос расширения информационного канала обратной связи от полуавтоматической системы к оператору.

Наиболее распространенным каналом обратной связи на данный момент является визуальный. В простейшем случае в рабочей области устанавливается камера, изображение с которой передается на пункт управления. Таким образом, оператор способен в реальном времени оценивать текущую обстановку в рабочей области и планировать движения рабочего инструмента манипулятора. Непосредственное управление манипулятором может быть осуществлено и по абсолютным значениям положений звеньев, однако такой подход является для человека контринтуитивным. Главным преимуществом визуального канала обратной связи является его естественность для человека. В повседневной жизни люди получают большую часть информации именно через глаза, поэтому данный вид обратной связи является также наиболее выгодным с точки зрения передачи полезной информации.

Силомоментное очувствление в полуавтоматических системах управления

Одним из методов повышения качества управления эргатическими системами является увеличение количества получаемой оператором в процессе работы информации. Это может быть достигнуто расширением существующих каналов дополнительными слоями данных, например, использование не только обычных камер, но и тепловизионных. Однако в данной статье предлагается другой путь – введение дополнительного канала обратной связи. Важнейшим параметром, влияющим на качество управления полуавтоматической системой, является его интуитивность. Для взаимодействия с человеком наиболее естественными являются контуры обратной связи, которые заменяют или расширяют человеческие.

С биологической точки зрения человек обладает 6 органами чувств: глаза (зрение), уши (слух), язык (вкус), нос (обоняние), кожа (осязание, ощущение боли, температуры), вестибулярный аппарат (чувство равновесия и положения в пространстве, ускорение, ощущение веса).

Выше уже было рассмотрено зрение, как базовый канал для управления в эргатических системах. Звуковой канал обратной связи является значительно менее информативным и допускает неоднозначность интерпретаций, поэтому он применяется реже. Однако с технической точки зрения его реализация не вызывает существенных сложностей. Использование обоняния в промышленных системах также не является информативным. С его функциями лучше справляются различные газоанализаторы, выдающие более точное и однозначное заключение об условиях в рабочей области. Кроме того, реализация обратной связи по обонянию является неоправданно сложной технической задачей. В свою очередь использование вестибулярного аппарата нашло узкий круг применения, однако это почти не относится к промышленным системам, потому что они остаются статично закрепленными в процессе работы, изменяя положение только рабочего органа.

В свою очередь обратная связь по осязанию является очень удачным вариантом для повышения интуитивности управления. Взаимодействие с объектами в той или иной степени, как наиболее распространенная задача эргатических систем, подразумевает для человека осязательные ощущения. Информация о прикосновении к объекту, жесткости его поверхности, текстуре, а также температуре, могут значительно повысить качество управления оператором. Кроме того, они обладают высокой степенью интуитивности, так как заменяют естественные для человека ощущения.

Важно отметить, что в промышленной робототехнике силомоментное очувствление нашло определенное распространение. В промышленных манипуляторах оно используется для работы с разнородными объектами. Это позволяет схвату сжимать предметы для переноски без деформации. Информация о силах и моментах, действующих на схват в процессе работы, также позволяет снизить требования к точности позиционирования объектов в рабочем пространстве робота [3, 4].

Силомоментное очувствление также получило распространение и в мобильной робототехнике, однако там оно обычно используется для управления манипуляторами, установленными на подвижных платформах [5, 6].

Следует также упомянуть о применении силомоментного оцувствления в полуавтоматической системе в ходе проведения совместного космического эксперимента Роскосмоса, Германского аэрокосмического центра (DLR), ЦНИИ РТК и РКК «Энергия» под названием «Контур-2». В нем изучались возможности телеуправления напланетными роботами с борта орбитального космического аппарата по комбинированному каналу связи с ограниченной пропускной способностью для решения задач исследования планет Солнечной системы. Однако в данном случае воздействие на рукоятку управления использовалось не для передачи информации о силах, действующих на робота, а о текущей ошибке позиционирования и величине задержки сигнала. Таким образом, решалась задача управления в случае сложных условий передачи сигналов управления, но не повышения качества управления, путем передачи информации о силах, действующих на рабочий орган системы [7].

Однако, в отличие от полностью автоматических промышленных систем, в полуавтоматических системах реализация данного контура управления является более комплексной и сложной задачей, требующей дополнительных исследований и проектных обоснований. Далее будут рассмотрены проблемы, связанные с реализацией контура обратной связи по тактильным ощущениям между эргатической системой и оператором.

Проблемы реализации систем силомоментного оцувствления

В общем виде система силомоментного оцувствления требует реализации нескольких устройств: датчик моментов и сил, действующих на рабочий инструмент манипулятора, математический вычислитель, осуществляющий предварительную обработку сигнала датчика, переход в систему координат оператора и т.д., а также исполнительные приводы, которые будут создавать рассчитанные моменты на устройстве управления, например, ручке.

В качестве первой проблемы было выделено влияние кинематической цепи, связанной с датчиком, на достоверность данных. В идеальном случае любые тела, находящиеся между сенсором и исследуемой поверхностью тела, должны либо быть абсолютно твердыми и жесткими, либо должны отсутствовать. Однако при реализации такая конструкция является сложно достижимой. Это провоцирует то, что изгибы, эффекты сухого и вязкого трения приводят к отработке некорректной тактильной сигнатуры поверхности. Кроме того, это накладывает ограничения на возможный выбор методики измерения моментов и сил. Любой косвенный метод измерения также повлечет за собой неточность в реализации системы.

Второй проблемой можно назвать связь фильтрации и запаздывания. Главной задачей внедрения силомоментного оцувствления в эргатическую систему является повышение качества управления его интуитивности. Однако человеческий мозг очень требователен к величине задержек, при которых сохраняется натуральность процессов. Если при управлении будет отсутствовать синхронизация между тем, что человек будет видеть через камеры, и тем, что он будет чувствовать с управляющего устройства, это может приводить не только к потере интуитивности управления, но и к общему ухудшению качества управления, делая влияние силомоментного оцувствления не нейтральным, а даже отрицательным.

В тоже время сигнал с датчиков усилия зачастую обладает высокой степенью зашумленности и требуется фильтрации. Фильтрация, в свою очередь, вносит задержки в систему управления, которые могут быть критичны по описанным выше причинам. Таким образом при выборе алгоритмов фильтрации следует опираться не только на математические модели, но и на проведение натуральных исследований о влиянии текущих задержки фильтра на восприятие человеком ощущений от управления.

Следующей важнейшей проблемой является реализация компенсации силы тяжести. Данная проблема может появиться и на стороне датчика, и на стороне управляющего устройства и зависит от конструктивных особенностей этих блоков. Для реализации интуитивной обратной связи требуется определение трехмерных векторов сил и моментов в пространстве. Если в определенный момент времени хват манипулятора не будет касаться какой-либо поверхности, единственной действующей на него силой окажется сила тяжести.

Однако нет никакой необходимости передавать эту силу на управляющий орган оператора, поэтому она должна быть скомпенсирована рассчитанным значением.

В случае стационарных систем компенсация гравитации представляет задачу решения обратной задачи кинематики и последующего преобразования вектора силы тяжести из системы координат схвата в систему координат сенсора. Однако, как уже отмечалось выше, эргатические системы приобретают все большую популярность в задачах космической отрасли [8, 9].

В этом случае величина силы тяжести также становится переменной величиной. Ее значение должно будет рассчитываться в зависимости от высоты, ближайшего космического тела и т.д. [10]. Кроме того, расчет направления ее действия становится более комплексной задачей, потому что космический аппарат может менять свое положение относительно планеты в процессе работы робототехнической системы.

В качестве четвертой проблемы было выделено появление естественной обратной связи в системе. При появлении препятствия на пути движения схвата манипулятора датчик усилия фиксирует появление противодействующей силы. Это сигнал передается на ручку управления оператора. Поскольку человек не обладает мгновенной реакцией он не успевает отреагировать на появившееся противодействие на ручке управления, что приводит к ее отклонению в обратном направлении, что, в свою очередь, приводит к движению манипулятора в направлении, противоположенном встреченному препятствию. Таким образом формируется проблема невозможности идентифицировать и разделять сигнал обратной связи по усилию и непосредственный управляющий сигнал управления.

Заключение

Реализация контура обратной связи по силомоментному оцувствлению в полуавтоматических системах является одной из актуальных и комплексных задач современной робототехники. В данной статье приведено описание управления в обобщенной системе, в состав которой входит человек (оператор). В качестве главного средства повышения интуитивности управления предложено силомоментное оцувствление. Раскрыт вопрос о проблемах, возникающих при попытке реализации данного контура в эргатических системах, в которые входят: влияние кинематической цепи, фильтрация и запаздывание, компенсация силы тяжести, а также проблема контура естественной обратной связи.

Список источников:

1. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 304 с.
2. Управление робототехническими системами с силомоментным оцувствлением: учебное пособие / И.Н. Егоров и др. – 2005.
3. Горянина К.И., Катин О.И., Донской Д.Ю. Сенсорные системы оцувствления адаптивного управления роботом-манипулятором общего назначения // Научное обозрение педагогические науки. – 2019.
4. Любарский А.В. Реализация робототехнических систем с силомоментным оцувствлением // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. ВГ Шухова. – 2019. – С. 1488-1492.
5. Солдатов А.В., Воротников С.А. Система силомоментного оцувствления мобильного манипуляционного робота специального назначения // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – №. 6 (6). – С. 26.

References:

1. Popov E.P. Theory of Linear Systems of Automatic Regulation and Control. 2nd ed. Moscow: Nauka; 1989.
2. Egorov IN, et al. Control of Robotic Systems With Force-Torque Sensing; 2005.
3. Goryanina K.I., Katin O.I., Donskoy D.Yu. Sensory Systems Tactile Sensing Adaptive Control of a Robot Manipulator General Purpose. Science Review. Pedagogical Sciences; 2019.
4. Lyubarsky AV. Implementation of Robotic Systems With Force-Torque Sensing. In: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of Belgorod Shukhov State Technological University. 2019;1488-1492.
5. Soldatov A.V., Vorotnikov S.A. System of Force-Moment Sensitization of Special-Purpose Mobile Manipulation Robot. Engineering Journal: Science and Innovation. 2012;6(6):26.

6. Технологии модернизации и оучувствления мобильных роботов специального назначения / Прянничков В.Е. и др. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – Т. 116. – №. 3. – С. 166-171.

7. Результаты космического эксперимента "Контур-2" по отработке технологий удаленного управления напланетными робототехническими объектами / Мулюха В.А. и др. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2017. – № 9 (194). – С. 153-169.

8. Сергеев А.В., Сергеев С.Ф. Индуцированная среда иммерсивного интерфейса мобильного космического робота с силомоментным оучувствлением // Человеческий фактор в сложных технических системах и средах (Эрго-2018). – 2018. – С. 211-217.

9. Сергеев А.В., Гук М.Ю. Управление мобильным роботом космического назначения с применением виртуальной реальности и силомоментного оучувствления // Пилотируемые полеты в космос. – 2018. – №. 4. – С. 44.

10. Ващенко А.В. Влияние возмущающих гравитационных сил, связанных с нецентральностью гравитационного поля Земли, на эволюцию орбиты космического аппарата // Труды МАИ. – 2007. – № 26. – С. 5.

6. Pryanichnikov VE, et al. Technologies of Modernization and Sensorics Enhancement for Special Purpose Mobile Robots. Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences. 2011;116(3):166-171.

7. Mulyukha VA, et al. The Results of the Space Experiment "Kontur-2" Dedicated to the Development of Technologies for Remote Control of On-Planet Robotic Objects. Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences. 2017;9(194):153-169.

8. Sergeev AV, Sergeev SF. Induced Environment of the Immersive Interface for Mobile Space Robot. In: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference on the Human Factor in Complex Technical Systems and Environments (Ergo-2018): 2018. p. 211-217.

9. Sergeev A.V., Guk M.Yu. Controlling a Mobile Robot for Space Purposes Using Virtual Reality and Force-Torque Sensitivity. Manned Flights Into Space. 2018;4:44.

10. Vaschenko A.V. Influence of Disturbing Gravitational Forces Associated With the Non-Centrality of the Earth's Gravitational Field on the Evolution of a Spacecraft Orbit. Trudy MAI. 2007;26:5.

Информация об авторах:

Брич Иван Александрович
аспирант Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

Шептунов Сергей Александрович
доктор технических наук, директор Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

Information about the authors:

Brich Ivan Alexandrovich
Postgraduate student of the Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences

Sheptunov Sergey Alexandrovich
Doctor of Technical Sciences, Director of the Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

Статья поступила в редакцию 06.05.2024; одобрена после рецензирования 05.06.2024; принята к публикации 09.06.2024.

The article was submitted 06.05.2024; approved after reviewing 05.06.2024; accepted for publication 09.06.2024.

Рецензент – Федяева Г.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Fedyayeva G.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.