

data-processing time; steadiness to internal and external perturbations during the all system operation steps. Complex of technological and software resources, informational security and staff is the management object of EDDPS. It's covered by control loop which includes management subject (decision maker — DM) and management tools (technical, software and informational). Such approach enables to solve the time-minimizing problem for operation system both with data processing and with its state changing. EDDPS mode control is connected with adjustments of system parameters characterizing its functionality (e. g. Operating mode, used DB, AWS composition, ICT structure etc.) and must ensure the transformation from one steady state to another. Behavioral model reflecting all possible mode transformations may be used as management foundation. Data processing control is done in a current state in aim of time minimization of the data reduction to increase the speed of system functionality in total. Minimum of time may be achieved for the relevant system class by using the program monitoring function which can be presented by schedule of ICT decisions on chosen AWS. Presented two control modes are independent as their usability may be mistiming — as they are used on the different steps of the system operation. The basis of EDDPS control is the paradigm of several control loops usage each of which realizes method requisite for the exact step. Controlled functionality EDDPS with minimized data processing time is realized by software utilities and informational management support.

Keywords: Ergatic distributed data-processing system (EDDPS), network, database (DB), informational-computing task (ITC), technological handling data chain (THDC), automated workstations (AWS), data processing, decision maker (DM)

For citation:

Tarasov E. N. Ergatic Distributed Data-Processing Systems Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 245—249.

DOI: 10.17587/mau/17.245-249

References

1. **Tanaev V. S., Sotskov Ju. N., Strusevich V. A.** *Teoriya raspisanij. Mnogostadijnye sistemy* (Schedule Theory. Sequential Systems), Moscow, Nauka, 1989, 328 p. (in Russian).

2. **Tarasov E. N.** *Avtomatizirovannaja sistema obrabotki dannyh kak object upravlenija* (Automated data-processing system as a control object), Proc. of FSUE "Academician Pilyugin Scientific-production

Center of Automatics and instrument-making", 2011, no. 2 (16), pp. 28—36. (in Russian).

3. **Tarasov E. N., Rumjancev G. N.** *Optimal'noe upravlenie avtomatizirovannoj sistemoj obrabotki dannyh* (Optimal control of automated data-processing system). Proceedings of FSUE "Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and instrument-making", 2014, no. 3 (29), pp. 14—19. (in Russian).

4. **Tarasov E. N., Vasen'kina N. N.** *Ispol'zovanie povedencheskoj modeli dlja upravlenija sostojaniem informacionnoj sistemy* (Usage of Behavior model to control the state of informational system), Proc. of FSUE "Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and instrument-making", 2012, no. 4 (22), pp. 3—12. (in Russian).

5. **Zagidullin R. R.** *Voprosy vybora i vnedrenija sistem upravlenija proizvodstvom klassov MES, APS, ERP* (Aspects of selection and implementation of manufacturing control systems MES, APS, ERP), available at: www.tadviser.ru (date of access 24.01.2011).

УДК 621.865:004.896

DOI: 10.17587/mau.17.249-253

В. А. Карташев, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., проф., kart@list.ru,

А. А. Богуславский, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,

С. М. Соколов, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. сектором,

Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

Обеспечение безопасности работы оператора методом разделения рабочих зон робота и человека¹

Обеспечение безопасности оператора в рабочей зоне робота методом выделения области работы каждого из них сводится к контролю непересечения границы между указанными областями. Сравнение возможностей существующих технических средств решения этой задачи позволяет сделать вывод о том, что наиболее удобными в использовании являются системы, построенные на основе СТЗ. Для обозначения линии границы в них предлагается использовать мигающие светодиодные модули. Результаты экспериментов показывают, что такое решение обеспечивает высокую надежность обнаружения пересечения границы в большом диапазоне условий освещенности.

Ключевые слова: безопасность совместной работы с роботом, система технического зрения, метод разделения рабочих зон

Введение

Необходимость обеспечения безопасности работы человека в рабочей зоне манипуляционного робота является основной проблемой, которая сдерживает развитие новых направлений манипуляци-

онных технологий: в строительстве, космонавтике, медицине. Накопленная к настоящему времени статистика десятилетнего использования медицинских робототехнических комплексов "Да-Винчи" в США [1] свидетельствует о существенной доле опасных инцидентов, произошедших в процессе эксплуатации. Опасные и фатальные ситуации имели место не только для оперируемого больного, но и для медицинского персонала, который нахо-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-08-01012-а).

дился рядом с установкой. К ним относятся непроизвольные движения, которые совершали манипуляторы во время работы, и ошибочные движения оператора-хирурга излишне большой амплитуды. Потенциальная угроза появления таких движений создает психологический дискомфорт.

Проблема обеспечения безопасности работы человека в рабочей зоне манипулятора возникла одновременно с появлением роботизированных технологий. В процессе обучения и настройки роботизированного комплекса оператор находится рядом с манипулятором. Высокая квалификация персонала, который выполняет эти работы, позволяет максимально снизить риски возникновения травм. В новых областях применения манипуляторов квалификация персонала оказывается недостаточной для того, чтобы заблаговременно выявить опасности в работе манипулятора.

Наибольшую безопасность обеспечивают такие технические решения, которые исключают перемещение манипулятора в рабочую зону человека. При этом в рабочей зоне манипулятора выделяется область, в которой работает человек и не допускается манипулятор. В настоящее время на рынке отсутствуют специализированные устройства для решения этой задачи. Рассмотрим некоторые из них.

Ограждающие конструкции

Для разделения зон работы человека и манипулятора часто используются ограждающие конструкции. Достоинствами такого решения являются:

- хорошая видимость границы рабочей зоны человека;
- хорошая защищенность работающего, если ограждающая конструкция является достаточно прочной.

Недостатки состоят в следующем:

- затруднено использование ограждающих конструкций для областей со сложной конфигурацией границы;
- достаточно трудно быстро изменить положение границы в соответствии с новыми условиями задачи;
- невозможность полностью исключить случайного или преднамеренного попадания человека в рабочую область манипулятора.

Рассмотрим некоторые особенности использования ограждающих конструкций подробнее.

При достаточной прочности ограждающие конструкции обеспечивают практически полную безопасность работы человека рядом с манипулятором. Однако это достоинство сильно сужает область их применения, так как достаточно трудно становится быстро изменить границу между рабочими зонами. Например, при настройке оборудования робототехнического комплекса положение рабочей зоны человека определяется текущими условиями задачи. Поэтому существенные затраты времени на уста-

новку защитных приспособлений могут послужить причиной отказа от них хотя бы в некоторых случаях.

Существенным недостатком ограждающих конструкций является невозможность исключить попадание человеком за устанавливаемую ими границу. Недостатком также является возможность поломки манипулятора или его рабочих органов при ударе об ограждение.

Инфракрасные датчики отраженного сигнала

Электронные средства контроля пересечения границы позволяют обеспечить большую гибкость как при задании линии границы, так и выборе действий при ее пересечении. Промышленностью выпускается несколько видов устройств, которые предназначены для контроля границы. Одним из них является инфракрасный поверхностный извещатель [2]. Он формирует инфракрасную зону контроля в виде двух плоскостей (рис. 1). Устройство принимает сигнал, отраженный от инфракрасной подсветки охраняемой линии. Если в зону действия прибора попадает какой-либо объект, то отраженный сигнал усилится. Как только он превысит заданный при обучении уровень, устройство формирует извещение о несанкционированном доступе.

Наличие двух плоскостей позволяет определять направление движения объекта. Это свойство дает возможность реализовать такой алгоритм контроля доступа, при котором обеспечивается вход человека в рабочую зону манипулятора и невозможность выхода за ее пределы манипулятора. Компактность рассматриваемого устройства делает работу с ним удобной, так как позволяет оперативно менять местоположение границы рабочих зон, подстраивая ее положение под требования задачи.

Основным недостатком рассматриваемого устройства является трудоемкость настройки порога срабатывания. Подстраивать порог необходимо всякий раз при изменении линии границы. Существенные трудности создает также невидимость для человеческого глаза границы контролируемой области вследствие того, что извещатель работает в инфракрасном диапазоне волн.

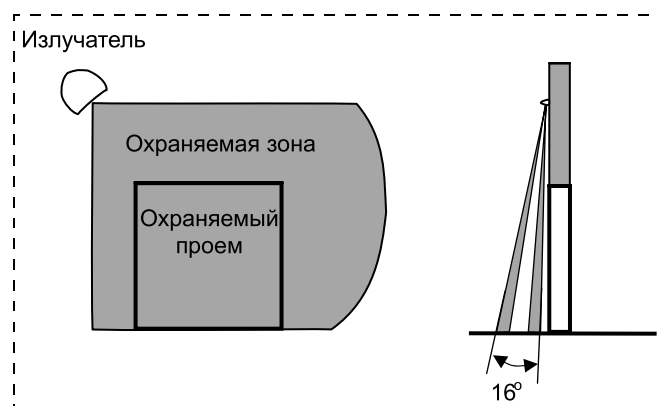


Рис. 1

Датчики, работающие на просвет

Устройство контроля границы рабочей зоны может быть построено на основе световых штор безопасности. Такие шторы производит японская фирма OMRON (рис. 2) [3]. Штора содержит линейный светодиодный излучатель видимого диапазона световых волн и линейный фотоприемник. В рабочем положении свет от излучателя должен быть направлен в сторону фотоприемника. Пересечение предметом плоскости между излучателем и фотоприемником приводит к тому, что сигнал от одного из фотоприемников становится меньше заданного порога. Устройство контроля световой шторы информирует систему управления об этом. Как излучатель, так и фотоприемник смонтированы в корпусе, который имеет вид столбика.



Рис. 2

Для удобства работы со световой шторой целесообразно смонтировать излучатель и фотоприемник на общей направляющей, которая позволяет устанавливать необходимое расстояние между ними, и снабдить направляющую ножками. Использование нескольких световых штор делает возможным выделение области, которая имеет границу в виде ломаной линии. Пара таких устройств, расположенных параллельно, позволяет определять направление пересечения границы.

Основными неудобствами при использовании световых штор является сравнительно большая высота устройства, вследствие чего их легко опрокинуть при случайном задевании. Кроме того, световые шторы не предполагаются мобильными. Наличие проводов мешает их быстрому перемещению и работе с ними.

Контроль границы рабочей зоны с помощью системы технического зрения

Использование для контроля границы системы технического зрения дает два преимущества: позволяет наблюдать сцену большого размера и реализовать программную обработку изображения.

Критическими параметрами такой системы являются время обработки кадра и надежность выделения линии границы при всех допустимых условиях освещенности.

В работе рассматривается система контроля линии границы, в которой видеокамера установлена таким образом, чтобы граница между рабочими областями манипулятора и человека постоянно находилась в поле ее зрения [4]. На рис. 3 приведена структурная схема взаимодействия системы технического зрения и системы управления манипуляционным роботом. Система технического зрения автоматически распознает при обучении положение линии границы и при нарушении ее передает сигнал системе управления манипулятором. При поступлении такого сигнала система управления аварийно останавливает манипулятор.

Имеющиеся на рынке системы технического зрения являются узкоспециализированными по типу задач, для решения которых они предназначены. Например, упомянутая фирма OMRON выпускает около 10 типов специализированных систем технического зрения для решения конкретных задач контроля на производстве. Ни одна из них не предназначена для контроля линии границы областей. Такая ситуация не позволяет использовать в рассматриваемой задаче готовые решения. Настоящее исследование ставит своей целью выработку способа контроля линии границы, включающего в себя:

- определение способа обозначения линии границы;
- разработку способа ввода в систему технического зрения местоположения линии границы;
- разработку критериев определения пересечения границы системой технического зрения.

Разнообразие вариантов кооперативной работы человека и манипулятора (настройка робототехнического комплекса и оперативное обслуживание технологического оборудования в процессе работы)

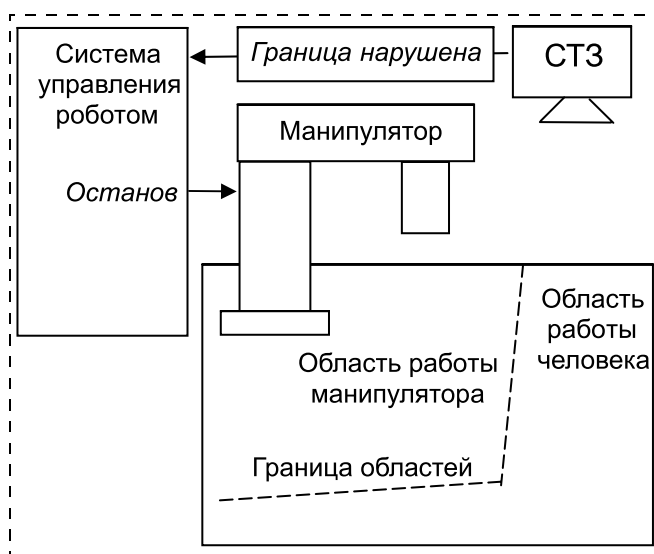


Рис. 3

обуславливает выбор такого способа указания границы, который позволяет быстро изменять ее положение, легко визуально определяется как человеком, так и системой технического зрения при любых условиях освещенности.

Требуемое решение не может быть получено только программными средствами обработки изображения, так как связано с простотой и удобством задания линии границы и восприятия ее органами зрения.

В качестве указателя линии границы были опробованы линейные объекты трех типов: 1) лента с градиентными признаками закрашки (в том числе ограничительные ленты безопасности с чередованием белых и красных полос); 2) гирлянда с априорно известной формой и цветом бусин; 3) светодиодные ленты и гирлянды; 4) светодиодные модули.

Система контроля с мигающими светодиодами

Наилучшие результаты были получены с помощью светодиодных модулей. Каждый модуль является автономным устройством, содержащим яркий мигающий светодиод. Эксперименты позволили установить, что такие светодиоды обеспечивают надежное определение положения границы при достаточно больших изменениях уровня освещенности рабочего места. Это связано с тем, что светодиод обнаруживается по изменениям на последовательных кадрах яркости изображения. В надежности метода нетрудно убедиться непосредственным сравнением изображений, приведенных на рис. 4 (см. вторую сторону обложки). Рис. 4, *а* соответствует условиям освещенности при рассеянном свете в помещении; рис. 4, *б* — при сильной боковой засветке искусственным источником освещения; рис. 4, *в* — при затемнении в помещении. В левой части рис. 4 светодиод погашен, в правой — зажат. Горящий светодиод виден на кадре как область с ярко-красными или засвеченными пикселями. Когда светодиод погашен, их яркость становится существенно меньшей.

Частота колебаний яркости мигающих светодиодов около 3 Гц, скважность близка к 1. Равенство длительности фаз колебаний яркости делает возможным обнаружение мигания за промежуток времени, который незначительно превышает полупериод. Этого промежутка времени достаточно для того, чтобы обнаружить свечение светодиода (это означает, что он не закрыт посторонним предметом) и убедиться, что яркость его изменяется (т.е. пиксел изображения принадлежит мигающему светодиоду).

При частоте мигания 3 Гц полупериод равен $1/6$ с. При частоте развертки 25 Гц изменения состояния светодиода ("горит — не горит" и "не горит — горит") можно установить по пяти кадрам, т. е. за 0,2 с. Если светодиод закрыт посторонним предметом, то на всех пяти кадрах изменения яркости окажутся незначительными.

Для того чтобы указать границу зоны работы манипулятора, оператор раскладывает вдоль нее

светодиодные модули и дает системе технического зрения команду запомнить указанную линию. Затем система технического зрения определяет период и скважность мигания светодиодов. Обе эти величины определяются с достаточно большой точностью в силу того, что частота следования кадров видеокамеры почти на порядок больше частоты мигания светодиодов. Запоминаются также координаты мигающих пикселей. После получения команды окончания обучения система управления переходит в режим контроля новой линии границы.

Контроль пересечения границы реализуется в соответствии со следующим алгоритмом. Система технического зрения определяет расстояние (в пикселях) от каждой мигающей точки, запомненной при обучении, до ближайшей мигающей точки на изображении наблюдаемой сцены. Если хотя бы для одной из них расстояние окажется больше допустимого, то делается вывод о том, что имело место пересечение границы. Если расстояние между всеми мигающими точками не превышает заданной величины, то принимается, что граница не нарушена.

Посторонний предмет может попасть в рабочую зону незамеченным только в том случае, если его скорость достаточна для того, чтобы за промежуток времени 0,2 с он успел пересечь границу.

Рассмотрим пример. В конструкции манипулятора РМ-01 наименьшие размеры имеет запястье (90×90 мм). Система технического зрения способна обнаружить пересечение им границы только, если его скорость не превышает 450 мм/с. Полученная оценка позволяет сделать вывод о том, что время реакции системы технического зрения на пересечение границы достаточно для обеспечения безопасности оператора в таких операциях, как позиционное обучение от ручного пульта управления и отработка технологических движений, так как скорость перемещения рабочего органа в них обычно достаточно мала.

Заключение

Разделение рабочих зон манипулятора и оператора является одним и часто используемых способом обеспечения безопасной работы человека в рабочей зоне манипулятора. Это разделение может быть выполнено с помощью существующих устройств: ограждающих конструкций и электронных систем доступа с датчиками инфракрасного и видимого светового диапазона. Решениям, которые с их помощью могут быть реализованы, присущи отдельные недостатки, связанные с особенностями конструкции этих устройств: к ним относятся неудобство задания сложной линии границы или трудоемкость перенастройки устройства.

Использование для контроля системы технического зрения позволяет получить устройство с простым и гибким управлением. Одним из компонентов такой системы является устройство индикации границы. В работе предложено использовать в качестве

него яркие мигающие светодиодные модули. Эксперименты показали, что такое решение позволяет упростить обучение системы технического зрения и обеспечить надежный контроль в широком диапазоне изменений освещенности рабочего места.

Список литературы

1. Alemzadeh H., Iyer R. K., Kalbarczyk Z., Leveson N., Raman J. Adverse Events in Robotic Surgery: A Retrospective Study of 14 Years

of FDA Data // Proc. of 50-th Annual Meeting of The Society of Thoracic Surgeons. Orlabdo, Florida, USA. 2014.

2. Извещатель охранной поверхности оптико-электронный ИО309-19 "ИКАР-Ш". Руководство по эксплуатации СПНК.425152.008 РЭ ЗАО. "Аргус-Спектр". С. 37.

3. Каталог продукции OMRON. Системы безопасности. URL: http://www.industrial.omron.ru/ru/products/catalogue/motion_and_drivers/robots/default.html.

4. Карташев В. А., Богуславский А. А., Карташев В. В., Ярошевский В. С., Михасеку С. В. Задачи управления манипуляционным роботом для обеспечения безопасности перемещений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 1. С. 28—32.

Maintenance of Safety in Man-robot Co-working Operations by the Highlighted Area Method

V. A. Kartashev, leading research fellow, kart@list.ru,

A. A. Boguslavsky, leading research fellow, angb74@mail.ru,

S. M. Sokolov, head of laboratory, sokoplsm@list.ru

Keldysh institute for Applied Mathematics of RAS, 125047, Miusskaya sq, 4, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Kartashev Vladimir A., leading research fellow, Keldysh institute for Applied Mathematics of RAS, 125047, Miusskaya sq, 4, Moscow, Russian Federation
e-mail: kart@list.ru

Received on October 28, 2015

Accepted on November 06, 2015

The problem of safety restrains spreading of man-robot co-working technologies. The paper investigates the applications in which staff works in robot work area.

They include repairing, testing and adjustment procedures of technological equipment, manipulator and its programme of functioning. Particularity of these operations consists in frequent changing of operator activity points and the need to watch result of robot motions in close proximity to equipment, part or attachment fixed in manipulator jaws. Highlighted workspace method is one of the way to ensure the safety of worker. The method consists in restriction of robot movements in man working area. It can be realized by standard technical equipment such as mechanical enclosing structures, electronic access systems and light curtain devices. The investigation shows that they are not convenient in use because are not adapted for operational borderline changing. The comparison shows that systems which based on technical vision are better suited for such applications. They give more additional information to robot control system for flexibility selection of preprogrammed behavior when borderline intersection is detected. Highlighted workspace method includes two phases: marking of borderline between working areas and monitoring to prevent line intersection by robot or man. The means of borderline marking should support operative changing of borderline, simple teaching procedure of system technical vision and reliable detection in valid level of illumination. To satisfy above conditions special modules with blinking led lamps were developed. The paper describes procedure use of modules and gives results on detecting of their location in different brightness of backlighting.

Keywords: maintenance of safety in man-robot co-working operations, system of technical vision, the highlighted workarea method.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 14-08-01012-a.

For citation:

Kartashev V. A., Boguslavsky A. A., Sokolov S. M. Maintenance of Safety in Man-robot Co-working Operations by the Highlighted Area Method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 249—253.

DOI: 10.17587/mau/17.249-253

References

1. Alemzadeh H., Iyer R. K., Kalbarczyk Z., Leveson N., Raman J. Adverse Events in Robotic Surgery: A Retrospective Study of 14 Years

of FDA Data, Proc. of 50-th Annual Meeting of The Society of Thoracic Surgeons, Orlabdo, Florida, USA, 2014.

2. Извещатель охранной поверхности оптико-электронный ИО309-19 "ИКАР-ШЧ" Руководство по эксплуатации СПНК.425152.008 РЭ ЗАО. "Аргус-Спектр". Р. 37. (Optic-electron protective annunciator IO309-19 "IKAR-SHCH" Manual SPNK.425152.008 RE ZAO. "Argus-Spectr". P. 37) (in Russian).

3. Каталог продукции OMRON. Системы безопасности. (OMRON. Protective systems) (in Russian), available at: http://www.industrial.omron.ru/ru/products/catalogue/motion_and_drivers/robots/default.html.

4. Kartashev V. A., Boguslavsky A. A., Kartashev V. V., Yaroshevsky V. S., Mikhaesku S. V. Zadachi upravleniya manipulyatsionnym robotom dlya obespecheniya bezopasnosti peremeshchenij (Problems of manipulator motions safety), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 17, no. 1, pp. 28—32 (in Russian).