

Авторы благодарят проф. Р. Поправе (Фраунхофский институт лазерных технологий) и проф. И. Миамото (Университет, г. Осака) за полезные советы и своевременные наставления в течение всего процесса исследования. Авторы благодарны также проф. В. Шульцу, д-ру К. Клаге и инж. Ф. Шмиту (Фраунхофский институт лазерных технологий) за информативные дискуссии.

1. Kramer T., Olowinsky A., Durand F. «Shadow» — a new welding technique // Proc. of photon processing in microelectronics and photonics. — SPIE. — 2003. — 4637. — P. 545–554.
2. Olowinsky A., Kramer T., Durand F. Laser beam micro welding in watch industry // Ibid. — P. 571–580.
3. Klages K., Ruettimann C., Olowinsky A. Laser beam micro welding of dissimilar metals // Proc. of Intern. Congr. on application of laser & electro-optics ICALEO 2003. — 2003. — CD-ROM.
4. Kramer T., Olowinsky A. Out of «Shadow»: Watch parts in the spotlight // Proc. of photon processing in microelectronics and photonics. — SPIE. — 2003. — 4977. — P. 481–492.
5. Klages K., Olowinsky A., Gedicke J. Performance of «Shadow» // Proc. of laser assisted net shape engineering. — 2004. — P. 633–642.
6. Gedicke J., Olowinsky A., Klages K. Advancements of «Shadow» — laser beam welding of compression molded copper // Proc. of the 6th Intern. symp. on laser precision microfabrication LPM 2005. — 2005. — On-line.
7. Pat. WO 03/013779 A1 International.
8. «Shadow» — new applications in electronics and micromechanics / A. Olowinsky, J. Gedicke, A. Gillneer et al. // Proc. of Intern. Congr. on application of laser & electro-optics ICALEO 2006. — 2006. — CD-ROM.
9. Isamu Miyamoto, Seo-jeong Park, Toshihiko Ooie. Ustrafine-keyhole welding process using single mode fiber laser // Proc. of Intern. Congr. on application of laser & electro-optics ICALEO 2003. — 2003. — CD-ROM.
10. Harp W., Tu J. Investigation of the transition from micro-drilling to micro-welding using a 300W fiber laser // Proc. of Intern. Congr. on application of laser & electro-optics ICALEO 2006. — 2006. — CD-ROM.

The characteristics of micro-welding for thin stainless steel foil were investigated using high speed laser scanning with both single-mode fiber laser and pulsed Nd: YAG laser. The overlap welding of 25 μm thickness sheet could be successfully performed using a laser beam with a small focus diameter, regardless of the presence of a small gap between two sheets.

Поступила в редакцию 20.03.2008

УДК 621.791

ТЕХНОЛОГИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ СВАРКИ

Л. ВУ, Х. К. ЛИ, Х. М. ГАО, Г. Ж. ЖАНГ

(Гос. глав. лаб. перспектив. технологии свароч. пр-ва, Харбин. технолог. ин-т, Китай)

Описана структура и реализация телеробототехнической сварочной системы, предназначенной для выполнения дистанционной сварки в недоступных или опасных средах. Система основана на применении трех технологий: оучувствления с помощью технического зрения с лазерным сканированием, стереоскопического наблюдения, а также планирования и управления на основе виртуальных сред. В системе имеются три режима управления: телеобучение, автономное управление и управление в супервизорном режиме на основе виртуальных сред. Видеосенсор с лазерным сканированием применяется для автономного планирования траектории сварки, а также для задания характерной точки профиля сварного соединения в целях телеобучения. В качестве основы для моделирования и планирования траектории перемещения робота используется графическая среда, которая в супервизорном регионе применяется также и для контроля удаленной среды при горении дуги. Рассмотрены результаты проверки эксплуатационных характеристик системы и пути ее усовершенствования.

Ключевые слова: оучувствление, техническое зрение, лазерное сканирование, графическое моделирование, телеробототехническая система, дистанционная сварка

Потребность в использовании сварочной технологии в экстремальных условиях, а также в недоступных и опасных местах, например, при высокой радиации, под водой, в космосе, существует уже давно. Однако полностью автономный или независимый робот не может выполнять дистанционную сварку вследствие ограниченности искусственного интеллекта, технологии оучувствления и компьютерного принятия решений. В связи с этим все большее внимание привлекает телеуправление при выполнении

дистанционной сварки, при которой оператор может взаимодействовать с робототехнической системой, применяя соответствующие стратегии управления и технологию оучувствления [1].

В начале дистанционную сварку применяли для ремонта деталей ядерных реакторов. Реализация проекта по ремонтной сварке ядерного реактора «ДугласПойнт» в Канаде в связи с аварией, вызванной образованием течи, показала, что дистанционную сварку можно применять на практике [2]. В этом проекте использовали два манипулятора и семь камер в качестве исполнительного сварочного механизма и для контроля установки. Дж. Э. Агапакис и К. Масубучи из Мичиганского технологического института считают, что телеуправ-

ление сваркой не должно просто имитировать процесс ручной сварки [3]. Важную роль для дистанционной сварки играет оучувствление с помощью технического зрения и компьютерное программирование.

Для контроля и ремонта швов, выполненных дистанционной сваркой, используется несколько систем телеуправления. По программе ядерной энергетики Франции фирма «Framatome» разработала телеробототехническую систему для ремонтной сварки и контроля качества швов [4]. Для планирования траектории сварки и моделирования окружающих условий применяется компьютерная программа «RoboCAD». Д. Р. Брум и другие ученые разработали систему с телеробототехническим управлением для контроля швов, выполненных под водой, как часть проекта ARM (фирмы ARM) [5]. В этой системе применяется технология трехмерной видеоиндикации и перехода точек обзора. Для управления манипулятором с целью определения траектории сварки и шлифовки используется несколько режимов управления: прямой ручной, усиленный ручной, полуавтоматический и автоматический.

Наша лаборатория начала исследования в данной области в 1994 г. Г. Ж. Жанг создал экспериментальную систему телеуправления сварочным копирующим манипулятором. Он пришел к выводу, что, чем выше скорость слежения по шву, тем хуже его качество. Трехмерный видеодисплей может помочь повысить точность слежения по шву [6]. Х. К. Лу применил совместное и распределенное управление в телеробототехнической системе дуговой сварки для управления движением сварочной горелки [7].

Дистанционная сварка имеет три особенности [8]:

сложность сварочного процесса, поскольку он включает множество контролируемых параметров (положение горелки и ее ориентация, длина дуги, скорость и др.);

необходимость повышенной точности слежения по шву и минимальной погрешности при определении скорости, что способствует точному распознаванию зоны выполнения задачи и условий сварки;

невозможность использования силового датчика, поскольку сварочная горелка при сварке не касается окружающей среды и давление дуги слишком низкое.

Техническое зрение — это единственное средство для установления обратной информационной связи при дистанционной сварке. Система дистанционной сварки должна включать соответствующую систему технического зрения, устройства ввода и управления.

При дистанционной сварке оператор является центром принятия решений, а сварочный робот,

работающий на удаленном узле, — исполнительным центром. Совмещение высоких интеллекта оператора и рабочих характеристик сварочного робота очень важно для повышения гибкости и эффективности телеробототехнической системы. Необходимо, чтобы философия управления включала глобальное управление в супервизорном режиме и локальное автономное управление.

Применение технологии видеосчитывания с лазерным сканированием позволяет получать информацию о характеристиках сварных швов и отсылать ее в блок управления роботом для регулировки положения сварочной горелки [9]. Поскольку лазер является источником активного излучения, у него нет таких ограничений, как у источника фонового излучения окружающей среды. Уменьшение размеров сенсора, увеличивает гибкость выполнения сварочных операций. Планирование и управление с использованием графической среды также имеет большое значение для технологии телеуправления, которую можно использовать для планирования траектории сварки и моделирования реальных условий. В период горения дуги видеодисплей отключается и процесс сварки можно контролировать только с помощью виртуальной среды.

В настоящей работе рассматривается конструкция и реализация системы телеуправления сваркой НТ-WTRS, основанная на видеосчитывании с лазерным сканированием и графическом моделировании, а также физическая архитектура и архитектура программного обеспечения. Показано, что система состоит из новейших инструментальных средств таких, как видеосчитывание с лазерным сканированием (LSVS), дисплея объемных видеоизображений и средств планирования и управления на основе графической среды, что позволяет осуществлять прямое ручное управление, телеобучение, управление в супервизорном режиме и автономное. Описаны эксперименты, проведенные для демонстрации рабочих характеристик сварочной телеробототехнической системы и представлены их результаты.

Архитектура системы. Архитектура системы построена таким образом, чтобы максимально использовать интеллектуальные возможности оператора для принятия глобальных решений, возможности робота для выполнения локальных операций и дать оператору максимальную степень свободы при телеуправлении. Основная цель состоит в повышении рабочих характеристик при выполнении сварочных задач в неструктурированной среде и обеспечении максимальной легкости и удобства для оператора при выполнении сварки.

Архитектура системы аппаратных средств. Архитектура аппаратных средств экспериментальной системы состоит из двух частей — ло-

кальной части оператора и дистанционной рабочей (рис. 1). Связь между ними осуществляется через протокол TCP/IP (протокол управления передачей/межсетевой протокол) на основе локальной сети (LAN), что гарантирует эффективность работы оператора и электрическую изоляцию. Контроллер манипулятора работает в качестве сервера баз данных, а внешние компьютеры работают в качестве клиентов таких, как LSVS, компьютер-диспетчер и графическая станция. Все они соединены с HUB (концентратором или сетевым аппаратным узлом).

Локальная часть оператора состоит из следующих компонентов: пространственной мыши, компьютера диспетчерского управления или управления в супервизорном режиме, станции графического моделирования, стереоскопического дисплея и других вспомогательных устройств. Компьютер супервизорного управления (компьютер-диспетчер) выполняет три функции: дает текущую информацию о системе и состоянии выполнения задач и работает как видеодисплей для удаленного узла; посылает управляющие команды оператора в реальную и виртуальную среду; обрабатывает потоки информации и реализует планирование в режиме управления. Компьютер WMHMI работает с операционной системой Win2000, компьютерное обеспечение C++ 6.0. Программное обеспечение IGRIP (внутренний протокол дистанционного отображения) разработано фирмой «Visual» и базируется на системе UNIX, используется в качестве основы для планирования траектории сварки и графического моделирования. Применяется также разработанный нами стереоскопический дисплей, работающий в режиме переключения страниц.

Удаленный рабочий узел отвечает за выполнение сварочных задач. Он состоит из следующих устройств: копирующего манипулятора с шестью степенями свободы, панорамной цифровой камеры с переменным фокусным расстоянием DSP200X, двух стереоскопических камер, двух подвесных головок, сварочного источника питания, лазерного видеосенсора, сварочной горелки и других вспомогательных устройств.

Система HIT-WTRS состоит из внутреннего, среднего и внешнего контуров управления. Внутренний контур управления содержит контроллеры с высокой полосой пропускания. Лазерный видеосенсор и контроллер робота размещены в замкнутом контуре управления на уда-

ленном узле, который составляет средний контур управления. Внешний контур управления состоит из супервизорного компьютера или компьютера-диспетчера, контроллера робота, человека-оператора, видеодисплея и пространственной мыши. Управляющие команды от оператора поступают на уровень автономного планирования, уровень движения и уровень интеллекта с помощью систем управления в реальном масштабе времени, планирования задач и принятия решений.

Архитектура системы программного обеспечения. Ее можно подразделить на локальный узел оператора и удаленный узел (рис. 2). Режимы реализации взаимодействия человека и машины варьируются от полностью ручного управления до полностью автономного с этапами совместного, интерактивного и автономного управления.

В локальном узле в качестве клиента используется интерфейс WMHMI и графическое моделирование. WMHMI — основной интерфейс сварочной телеробототехнической системы, который является единственным интерфейсом, позволяющим управлять сварочным роботом и горелкой. При работе с виртуальной средой его можно дополнить специальным интерфейсом. WMHMI состоит из шести модулей: ввод управляющей команды; двумерный дисплей, работающий в реальном времени; дисплей состояния системы; планировщик взаимодействия человека и машины; установка параметров и модуль связи. Контроллер робота отправляет назад данные о траектории перемещения робота и отображает их в WMHMI посредством кривой, построенной в координатной

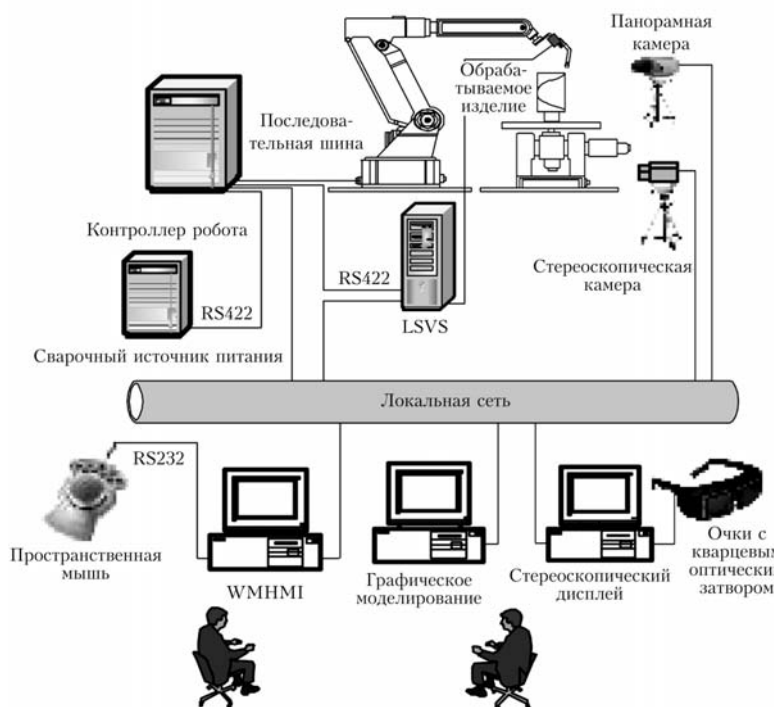


Рис. 1. Архитектура системы аппаратных средств HIT-WTRS

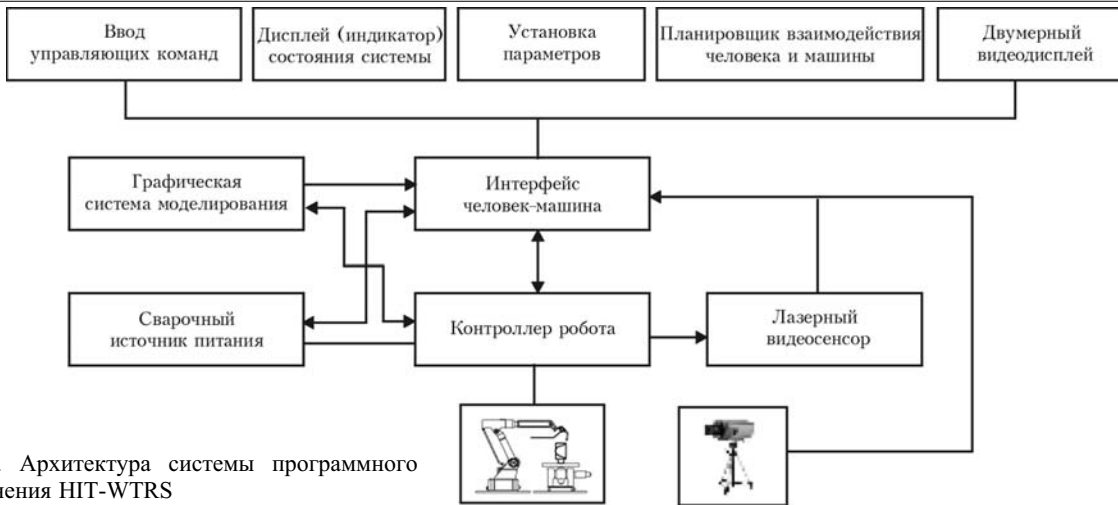


Рис. 2. Архитектура системы программного обеспечения HIT-WTRS

сетке, и обмена сообщениями. Изображение реальной рабочей ситуации, которое получают с помощью панорамной камеры, подается в WMHMI, а виртуальная рабочая ситуация отображается в системе графического моделирования. Интерфейс человек-машина показан на рис. 3. Программное обеспечение — внутренний протокол дистанционного отображения (IGRIP) служит для программирования плана траектории сварки и графического отображения виртуальной среды. В период горения сварочной дуги система используется в качестве окна для диспетчерского управления (в супервизорном режиме) вместо дисплея для визуализации панорамного изображения. Устройства ввода информации для управления скоростью и положением такие, как джойстик или пространственная мышь, применяются для формирования команд низкого уровня, а также для передачи этих непрерывных или дискретных команд в виртуальную или физическую среду. Лазерный видеосенсор обеспечивает распознавание и слежение по сварному шву. При стандартном сварном шве последний используется в качестве планировщика траектории для сканирования и слежения по шву. Если же шов нестандартный, то на его основе определяется характерная точка профиля сварного соединения для работы в режиме телеобучения.

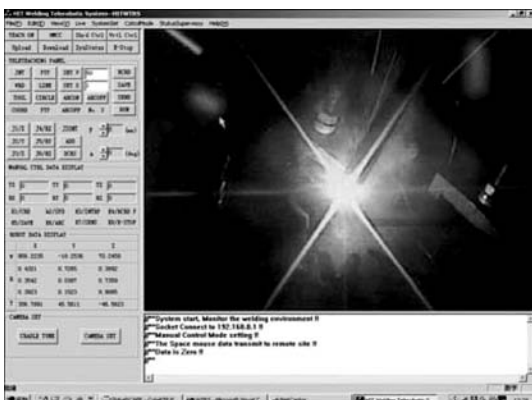


Рис. 3. Функциональная архитектура WMHMI

В дистанционном узле контроллер робота работает как сервер. После подключения клиента контроллер посылает информацию на узел клиента. LSVS сканирует характерную точку сварного шва и отправляют информацию в контроллер. На ее основе оператор может анализировать состояние манипулятора в удаленной среде и контролировать рабочий процесс. В виртуальной среде можно планировать траекторию перемещения горелки, а также загружать команды низкого уровня в виде файла в контроллер робота, осуществляющего дистанционную сварку.

Ручное управление на основе стереоскопической системы технического зрения (стереоскопической видеодисплей). Стереоскопическая система технического зрения показывает изображения, полученные стереоскопическими камерами, расположенными на узле подчиненного или копирующего манипулятора. Эти изображения формируются в компьютере из двух накладываемых друг на друга изображений, а затем передаются двумя разными камерами на удаленный узел. Чтобы видеть эти изображения, оператор должен надеть специальные очки с кварцевым оптическим затвором. Основное назначение стереоскопического видеодисплея состоит в том, чтобы оператор мог иметь ощущение глубины, что повышает информативность неструктурированной среды. В сварочной телеработотехнической системе ощущение глубины имеет особое значение, поскольку



Рис. 4. Стереоскопические камеры с подвесной головкой (а); работа оператора в режиме прямого ручного управления с использованием стереоскопического дисплея (б)

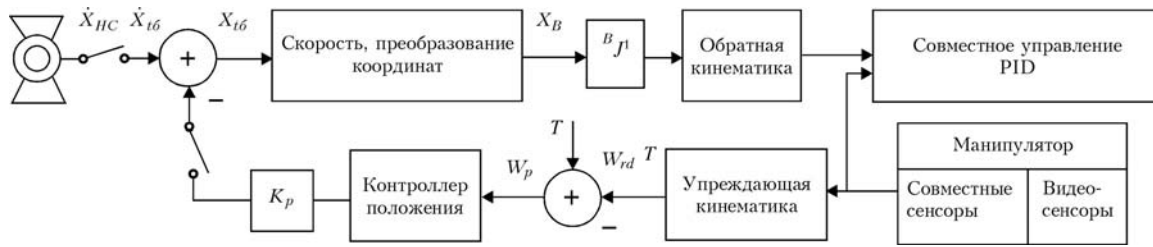


Рис. 5. Архитектура системы прямого ручного управления

помогает оператору перемещать сварочную горелку в зоне небольшого размера.

Глаза оператора с помощью зрительного нерва способны автоматически сопоставлять и идентифицировать увиденное. Точно также угол пересечения двух камер определяет зону изображения стереоскопической системы видения. Чтобы обеспечить поступление в нужное время правого и левого изображений, камеру на приборе с зарядовой связью (ПЗС) необходимо синхронизировать извне с помощью триггера. В основном один видеосигнал — это внешний синхронизирующий сигнал, запускающий второй видеосигнал. Каждый глаз поочередно видит эти изображения, которые синхронизируются с помощью очков. За 1 с появляется 70 изображений, т. е. каждый глаз видит поочередно 35 изображений. Такая частота кадров и высокое качество видеоизображений обеспечивают оператору ощущение глубины.

На рис. 4, а показаны две стереокамеры с контролируемой подвесной головкой, работающие на удаленном узле. В системе левый сигнал от камеры используется для запуска правой камеры. Осуществляется это следующим образом: левая камера снимает видеосигнал и посылает его к распределителю видеосигналов. На выходе видеосигнал из одного канала вводится непосредственно в карту сбора изображений, а с помощью сигнала из другого канала происходит запуск правой камеры. Данный метод обеспечивает синхронизацию правого и левого изображений. Режим отображения с переключением страниц используется для визуализации с разделением времени, что обеспечивает высокое разрешение и высокую частоту обновления изображений. Программное

обеспечение основано на языке программирования VC++. На рис. 4, б показано рабочее место оператора, использующего стереоскопический видеодисплей для дистанционного управления сварочной головкой.

Прямое ручное управление. С помощью пространственной мыши можно получать данные в режиме приращения, которые можно выразить следующим образом: $\dot{X}_{HC}(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{a}, \dot{b}, \dot{c})$. Первые три величины — это приращения положения, а последние три — приращения ориентации. Основной принцип ручного управления заключается в преобразовании \dot{X}_{HC} в управляющую переменную скорости обобщенной координаты $\dot{\theta}$.

Архитектура системы прямого ручного управления показана на рис. 5. Функциональная матрица Якоби манипулятора с переменным временем функционирования преобразует обобщенные координаты в декартовы координаты кадра $T_6(X_{t6} = J\theta)$. Уравнение необходимо инвертировать на каждом шаге управления. Во-первых, X_{t6} необходимо инвертировать в X_B , а затем с помощью уравнения $X_B = J\theta$ — в совместное управление, которое осуществляется с применением алгоритма пропорционально интегрально-дифференциального регулирования (PID). Далее, согласно правилам упреждающей кинематики, $\dot{\theta}$ можно инвертировать в $X'_{t6} = X'_{t6} + \dot{X}_{t6}$.

Телеобучение и автономное управление на основе LSVS. Технология LSVS обеспечивает выделение характерных точек соединения и в непрерывном режиме отправляет данные в контроллер манипулятора. Сварочный процесс можно осуществлять автономно по отклонению характерной точки и реальному положению сварочной горелки. В случае прерывистого сварного шва характерную точку можно использовать как точку для обучения; в этом и состоит принцип телеобучения с помощью LSVS.

Технология LSVS. На рис. 6, а показан сенсор лазерного сканирования, разработанный в нашей лаборатории. Принцип

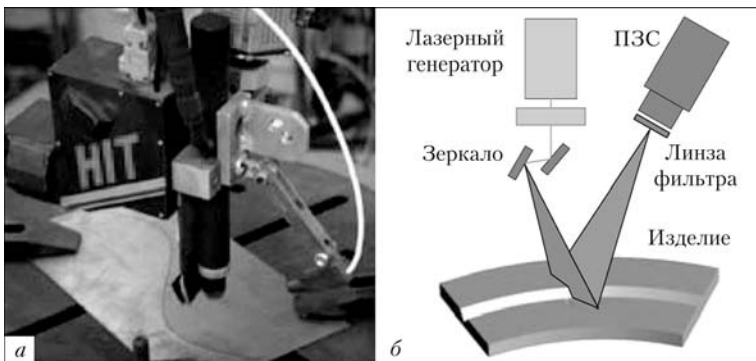


Рис. 6. Физическая архитектура видеосенсора с лазерным сканированием (а) и принцип работы технологии LSVS (б)

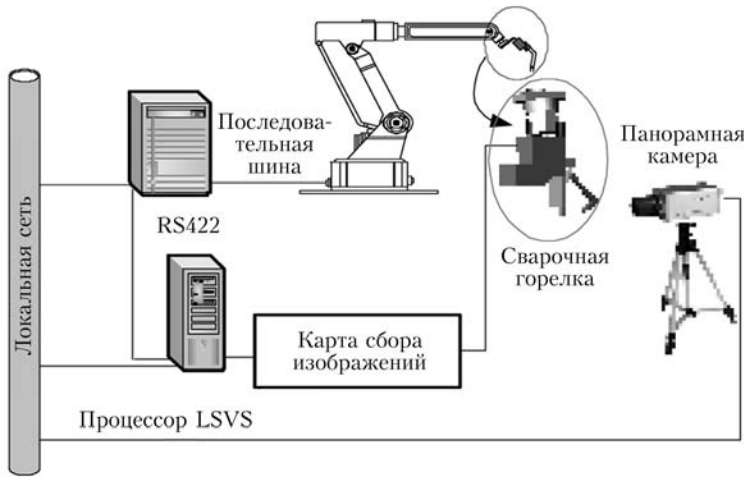


Рис. 7. Архитектура автономного управления

цип действия сенсора представлен на рис. 6, б. Сенсор состоит из лазерного диода, системы приема фотозлектрического сигнала, платы предварительной обработки сигнала, двигателя задающего устройства сканирования, платы обработки углового сигнала, устройства кодирования фотозлектрических сигналов и промышленного компьютера. Двигатель задающего устройства сканирования вращает зеркало для отражения луча лазера на поверхности обрабатываемого изделия, затем луч лазера отражается и подается в камеру на ПЗС. Данные в диапазоне от начальной точки до поверхности изделия и от изображений, уловленных ПЗС камерой, до центральной точки находятся в простой линейной зависимости. Данные о геометрии профиля сварного шва в координатах сенсора получают путем обработки пикселей на ПЗС.

Автономное управление. Лазерный видеосенсор может проследивать сварной шов в автономном режиме. В системе HIT-WTRS лазерная видеосистема используется в качестве локальной автономной. Для слежения за рабочим процессом видеосенсор устанавливают на сварочную горелку. Обозначим матрицу преобразования между сенсором и горелкой как tT_s . Обозначим характерную точку сварного соединения в координатах сенсора как T_w . Тогда ориентацию характерной точки шва в базовых координатах можно выразить как ${}^bT_w = {}^bT_6 {}^6T_t {}^tT_s T_w$ и сохранить в списке циркуляционной очередности. При сравнении ориентации горелки в следующем машинном цикле с ориентацией в данном машинном цикле получаем регулирующий вектор D_i : $D_i = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, dx, dy, dz]^T$, который используется для управления ориентацией горелки.

На рис. 7 показана архитектура автономного управления. Данные о характерной точке добавляются к данным о положении манипулятора в контроллере. Автономное управление целесообразно использовать для слежения за непрерывным

сварным швом, поскольку оно не вызывает помех в рабочем пространстве.

Телеобучение с помощью LSVS. В промышленном применении система LSVS используется как автономный планировщик траектории движения в случае непрерывного сварного шва. Если шов прерывистый, автономное управление отключается. Характерные точки соединения можно применять для телеобучения.

Когда координирующий компьютер или компьютер-диспетчер работает в режиме телеобучения, для визуализации информации об удаленном узле применяется панорамный и стереоскопический дисплей. При перемещении манипулятора над швом на высоте

10...40 мм (точное регулирование сварочной горелки не требуется) лазерная видеосистема обрабатывает изображение профиля соединения и рассчитывает данные о его характерных точках в реальном масштабе времени. Эти данные передаются в контроллер манипулятора с помощью последовательной коммуникационной шины RS422.

После введения установочных параметров для режима телеобучения, например, скорости сварки, необходимо интерполировать (видоизменить) режим и состояние дуги с помощью пространственной мыши и нажать кнопку записи для передачи сигнала сбора данных о соединении в контроллер. Информация о текущей ориентации манипулятора передается в координирующий компьютер и сохраняется в виде файла teach01.ttr. После завершения процесса обучения вся информация о траектории сварки загружается в контроллер манипулятора. Формат команд контроллера следующий:

```

STARTP                /*start program
MOVJ VJ = 20.000      /*joint motion, velocity:20
...
ARCON                 /*arc on
MOVL VL = 20.000     /*welding speed
...
ARCOFF                /*arc end
MOVL VL = 20.000     /*line interpolated, v = 20.0
...
ENDP                  /*stop program
STARTD                /*joint value record start
-11.25/33.84/-43.80/-48.81/35.64/155.97/
...
ENDD                  /*data end
    
```



Рис. 8. Блок-схема алгоритма телеобучения с помощью LSVS

Конкретный пример алгоритмической архитектуры показан на рис. 8. Телеобучение можно подразделить на три фазы:

- установка типа сварного шва;
- сканирование характерной точки профиля соединения и процесса;
- регистрация и прогон сварочного робота.

Управление в супервизорном режиме (диспетчерское управление) на основе графической среды. Система графического моделирования. В технологии управления на основе графической среды можно выделить два варианта: использовать пространственную мышшь для управления ро-

ботом в виртуальной среде со слежением по сварному шву, которая применяется для обучения оператора и углубления его знаний о методике телеуправления сваркой и характеристиках системы; использовать среду графического моделирования в качестве монитора, когда излучение сварочной дуги вызывает помехи на видеодисплее.

В качестве базовых программных средств для моделирования применяют IGRIP. Для калибровки относительной ориентации по интерактивному соответствию системы человек–машина характерной точке применяется технология калибровки виртуальной среды (VECT). Информация об ориентации горелки и сварного шва передается от удаленного узла в систему, и виртуальный робот калибрует ориентацию в соответствии с точкой обзора камеры. После калибровки реального робота и среды и виртуального робота и среды IGRIP может планировать траекторию слежения, осуществлять трансляцию программы, проверку столкновений и т. д. На рис. 9, а показана блок-схема калибровки и планирования задач. При выполнении дистанционной сварки излучение дуги не позволяет реализовывать визуальную обратную связь. При этом мы можем наблюдать изменение ориентации манипулятора и горелки, а также процесс сварки с помощью среды графического моделирования. Управление на основе графической среды устанавливает связь между физической средой манипулятора и средой, в которой выполняется задача, виртуальной средой манипулятора и средой задач в IGRIP.

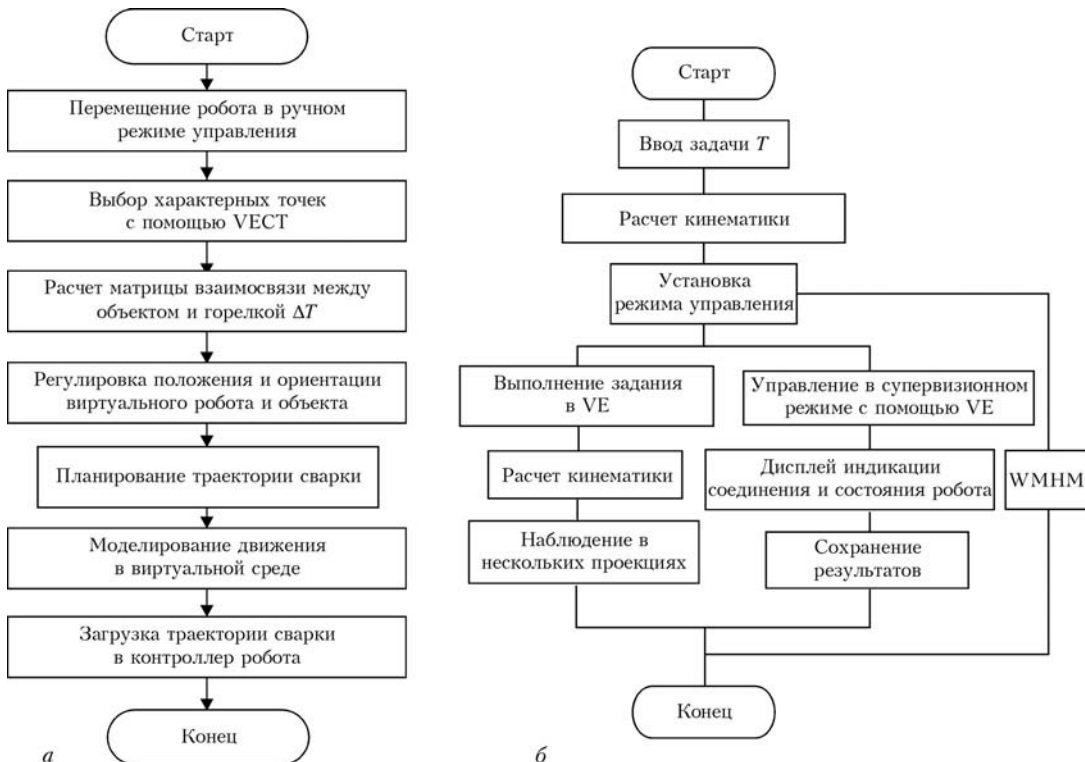


Рис. 9. Блок-схема калибровки и планирования сварочных заданий (а) и блок-схема управления в супервизорном режиме на основе графики (б)

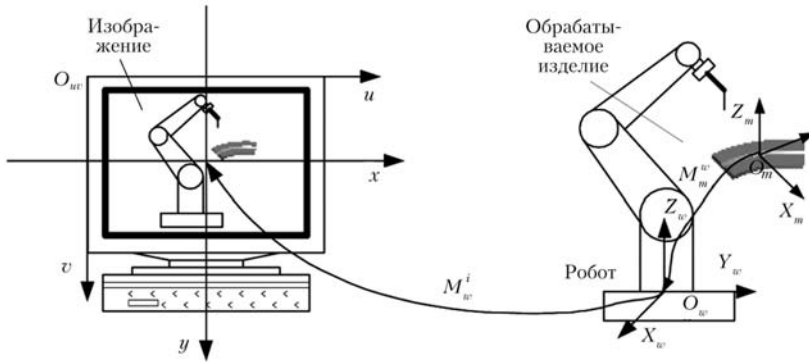


Рис. 10. Отображение объектов из реальной среды в виртуальную

Калибровка реальной и виртуальной среды. Разработка VECT на основе взаимодействия между человеком и машиной зависит от применения. Технология VECT применяется для извлечения характерных точек изображений в режиме взаимодействия человека и машины, для чего используется способность оператора распознавать и принимать решения по проблеме соответствующего сопоставления характерных точек. Как показано на рис. 10, с помощью VECT мы можем рассчитать матрицу зависимости между реальной (RE) и виртуальной (VE) средой M_w^i . Видеосистема состоит из двух камер с объективом, имеющим переменное фокусное расстояние и подвесную головку. При этом фокусное расстояние и параметры подвесной головки можно рассчитать в реальном масштабе времени.

Благодаря высокой гибкости и адаптируемости видеосистемы можно достичь высокой точности локализации. Калибровка камеры выполняется посредством нелинейного алгоритма, основанного на методе наименьших квадратов, в сочетании с линейным алгоритмом. Общая локализация структурированного изделия обеспечивается алгоритмом общей локализации, а локализация характерных точек — соответствующим алгоритмом их локализации. Для калибровки VE изделий различных типов разработан калибровочный модуль VE в IGRIP на основе VECT с трехточечной калибровкой вспомогательных характерных точек и четырехточечной калибровкой кольцевой стандартной детали.

Задачи, выполняемые HIT-WTRS. Поскольку телеробототехническая система сварки разраба-

тывается для опасных и недоступных сред, выполнение таких задач требует применения специальных методик, которые способствуют повышению эффективности системы и сокращению времени выполнения задач. Необходимо учесть еще один фактор, который заключается в снижении объема работ, выполняемых оператором в замкнутой системе автоматического регулирования или управления. Задачи в неструктурированной среде можно выполнять

в различных режимах управления — от традиционного ручного до управления в супервизорном режиме. С целью проверки эксплуатационных характеристик системы проведено два эксперимента. Для этого использовали сварку ТИГ. Этот способ сварки отличается высокой стабильностью и малым разбрызгиванием. В экспериментах осуществляли сварку прямолинейного и спирального шва.

В качестве ручного контроллера применяли пространственную мышь. Использовали также стереоскопический дисплей, робот для дуговой сварки с шестью степенями свободы, горелку для сварки ТИГ и цифровую видеокамеру с переменным фокусным расстоянием. Длина прямолинейного шва составляла 25 мм, соединение с V-образной разделкой имело ширину 1 мм. Ориентация сварочной горелки была постоянной. Сварку выполняли в ручном режиме, по трем осям контролировали положение сварочной горелки, скорость сварки, высоту и поперечное перемещение горелки. Дугу зажигали высокочастотной и ручной сваркой вдоль прямолинейного шва. На рис. 11, а показана кривая поперечного отклонения прямолинейного шва при ручной сварке, среднее отклонение составляет 1,5 мм, на рис. 11, б — кривая отклонения по высоте сварочной горелки, максимальное отклонение от среднего положения — 3,2 мм, а на рис. 11, в представлен процесс сварки.

Второй эксперимент по сварке спиральных швов в режиме телеобучения с использованием графической среды заключался в следующем. Объектом изучения был спиральный шов на трубе

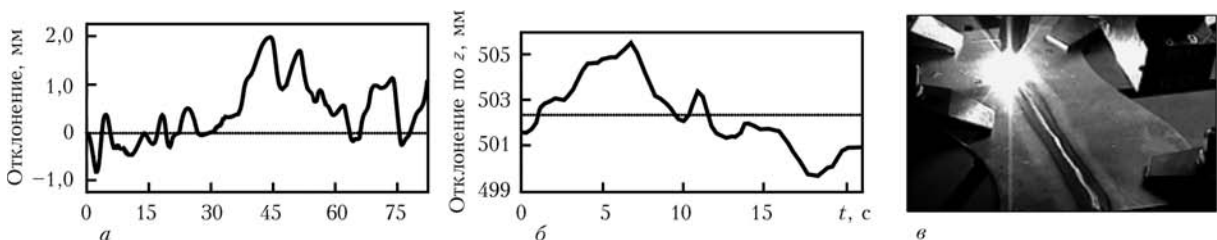


Рис. 11. Телеробототехнический процесс сварки прямолинейного шва: а — поперечное отклонение; б — по высоте z; в — процесс сварки

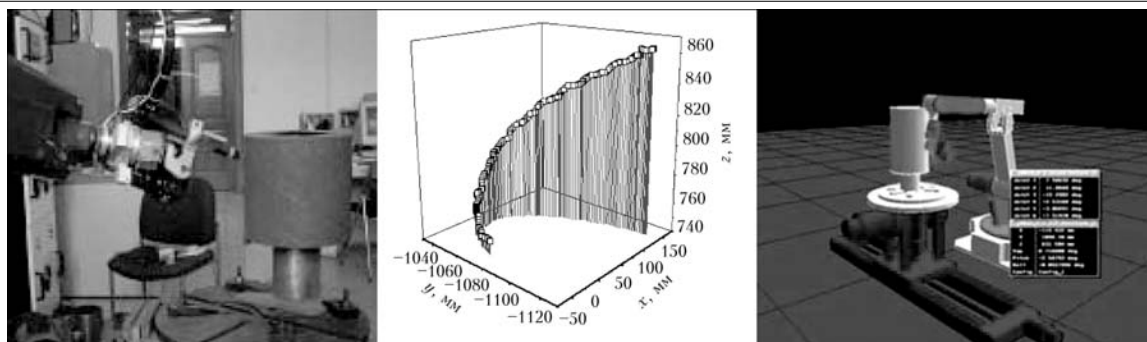


Рис. 12. Телеобучение при сварке спиральных швов с помощью LSVS

диаметром 250 мм и высотой 200 мм, 20 точек на шве регистрировали и сохраняли в виде файла. Затем их загружали в контроллер дистанционного робота и воспроизводили траекторию сварки. Процесс сварки контролировали в графической среде. На рис. 12 показано место выполнения сварки и результаты слежения.

Таким образом, система HIT-WTRS разработана для выполнения сварочных работ в опасных и недоступных средах. При выполнении задач используется несколько режимов управления: ручное управление на основе стереоскопического дисплея, телеобучение и автономное управление на основе лазерного видеосенсора и управление в супервизорном режиме в виртуальной среде. Всю систему можно подразделить на три контура управления — внутренний, средний и внешний. Система совмещает в себе возможность глобального планирования с помощью оператора и локального автономного управления с помощью робота (в зависимости от степени участия оператора в различных контурах управления). Технология стереоскопической индикации позволяет оператору лучше понять неструктурированную среду и повысить точность локализации и слежения. LSVS усиливает возможности системы при работе в неструктурированной среде, чего нельзя достичь с помощью источника фонового излучения.

In this paper a design and implementation of welding telerobotic system (HIT-WTRS) is presented, which is dedicated to remote welding maintenance in inaccessible or hazardous environment. The system integrated three technologies, namely laser scan vision sensing (LSVS), stereoscopic video display, and virtual environment-based plan and control. Three control modes are emphasized in this system respectively, which are teleteaching, autonomous control and virtual environment-based supervisory control. The laser scan vision sensor is used as autonomous welding path planner, and is also employed to provide the welding joint profile feature point for teleteaching. The graphics environment is used as simulation and path plan platform, and is also used as multi-viewpoint supervisory window to monitor the remote environment when arcing. Some performance results and ways to improve the system are discussed.

Данная работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая. Авторы выражают благодарность издателям и редакторам журнала за внимание при рецензировании статьи.

1. *On teleoperation of an arc welding robotic system / M. Hou, S. H. Yeo, L. Wu, H. B. Zhang. // Proc. of the IEEE Intern. conf. on robotics and automation. — Minneapolis, Minnesota, 1996. — P. 1276–1280.*
2. *Conrath J. J. Remotely controlled repair of piping at douglas piont // Intern. conf. on robotics and remote handling in the nuclear industry. — Toronto, Canada, 1984. — P. 112–121.*
3. *Agapakis J. E., Masubuchi K. Fundamentals and advances in the development of remote welding fabrication system // Welding J. — 1986. — 65(9). — P. 21–32.*
4. *Launary J.-P. Teleoperation and nuclear services advantages of computerized operator-assistance tools // Nuclear Eng. and Design. — 1998. — № 180. — P. 47–52.*
5. *Larkum T. J., Broome D. R. Advanced controller for an underwater manipulator // Proc. Third IEEE conf. on control application. — Glasgow, Scotland, 1994. — P. 157–162.*
6. *Zhang HuiBin. The establishment of master-slave teleoperation arc weldmg manipulator experiment system and operation characteristic investigation / Harbin Institute of Technology. — PhD dissertation, 1994.*
7. *Lu Weixin. Remote arc welding motion control new method research / Harbin Institute of Technology. — PhD dissertation, 1997.*
8. *Li Haichao, Wu Lin, Sun Hua. Applying shared visual control to telerobotic welding seam tracking // 3rd Intern. symp. on instrumentation science and technology. — Xi'an, China, 2004. — P. 921–925.*
9. *Pyunghyun Kirn, Sehun Rhee, Chang Heelee. Automation teaching of welding robot for free-formed seam using laser vision sensor // Optics and Lasers in Eng. — 1999. — 31. — P. 173–182.*

Поступила в редакцию 11.03.2008