УДК 681.5: 621.7
На правах рукописи

Ситу Аунг Со

РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В АДАПТИВНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ СВАРОЧНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

По специальностям: 05.13.01- Системный анализ, управление и обработка информации (в технических системах)

05.02.11- Методы контроля и диагностика в машиностроении

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

МОСКВА – 2015

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре систем автоматического управления.

Научный руководитель: **Гаврилов Александр Игоревич**
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Официальные оппоненты: **Лисов Олег Иванович**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский университет (МИЭТ)»

Бродягин Владимир Николаевич
кандидат технических наук,
главный сварщик, ГУП «МОСГАЗ»

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО НИУ «ВШЭ», Московский институт электроники и математики (МИЭМ)

Защита диссертации состоится 29 сентября 2015 г. В 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана» по адресу: 105005, г Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613., МГТУ им. Н.Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан «_» …… 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.02
кандидат технических наук И. В. Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Инновационные технологии в области переработки и транспортировки углеводородного сырья стремительно развиваются наряду с повышением потребностей социума в данных продуктах. Сети транспортировки – магистральные трубопроводы становятся все более разветвленными, их протяженность растет, повышаются темпы строительства. Основной технологией соединения труб большого диаметра в нитки магистральных трубопроводов по-прежнему остается сварка. При строительстве магистральных трубопроводов возникает ряд актуальных задач, таких как снижение уровня брака при сварке стыковых соединений, увеличение производительности процесса сварки, повышение уровня вероятности обнаружения дефектов.

В соответствии с Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 г. № 116-ФЗ газопроводы относятся к категории опасных производственных объектов, аварии и отказы в работе которых могут принести значительный материальный и экологический ущерб. При этом различного характера возмущения при строительстве трубопроводов, очевидно, не дают пока возможности достичь такого качества строительства и эксплуатации трубопроводов, при котором полностью бы исключалась вероятность появления дефектов, нарушения технологических параметров транспортировки продукта и, следовательно, надежности магистралей. Это подтверждают данные анализа Ростех надзора аварийности на трубопроводах, которые показывают, что основными причинами аварий являются внешние физические воздействия на трубопроводы (34,7 %), нарушения норм и правил производства работ, отступления от проектных решений (24,7 %), коррозионные повреждения (23,5 %), нарушения технических условий при изготовлении труб, деталей и оборудования (12,4 %), ошибочные действия эксплуатационного и ремонтного персонала (4,7 %). Значительная доля причин возникновения аварийных ситуаций, связанных с нарушения норм и правил производства работ, отступления от проектных решений, ошибочными действиями персонала выдвигают на передний план вопросы совершенствования сварочных технологий и оборудования. Так как от сварочных работ зависит общий темп строительства трубопроводов, то они могут стать существенным резервом в обеспечении воспроизводимости качества сварных соединений, эксплуатационной надежности трубопроводов, сокращения сроков выполнения строительных работ. При этом необходимость внедрения нового поколения оборудования для сварки неповоротных стыков труб обусловлена не только требованиями к повышению производительности сварки, но и необходимостью обеспечения высокой надёжности и качества сварных соединений.

Решение указанных проблем может быть достигнуто применением принципиально новых адаптивных цифровых технологий сварки и соответствующего оборудования, обеспечивающих:

– снижение уровня брака при сварке стыков труб;

МГТУ
им Н.Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

- увеличение производительности процессов сварки;
- повышение уровня вероятности обнаружения дефектов;
- обеспечение требуемого качества сварки за счет снижения роли человеческого фактора.

Это определяет актуальность темы диссертации и диктует необходимость дальнейшей разработки интегрированных систем автоматического управления процессом сварки с возможностями адаптивной коррекции на основе данных видеомониторинга и лазерной профилометрии. Настоящая работа является развитием исследований в области автоматизации сварочных процессов, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана Гладковым Э.А., Полосковым С.И., Гавриловым А.И. Перковским Р.А. под руководством академика РАН Н.П. Алешина (Патент на полезную модель RUS 121765 06.04.2011).

Цель диссертационной работы: Основной целью диссертационной работы является исследование и применение алгоритмов цифровой обработки изображений для решения задачи построения компактных моделей протяженных сварных соединений и геометрической адаптации сварочного оборудования на основе данных лазерной профилометрии и видеомониторинга.

В соответствии с указанной целью определены следующие задачи исследований:

1. Исследование особенностей современных технологий адаптивного управления сварочными комплексами.
2. Исследование типовых структур систем технического зрения и алгоритмов цифровой обработки изображений.
3. Обоснование возможности применения данных лазерной профилометрии и видеомониторинга для решения задачи построения компактных моделей сварных соединений.
4. Разработка методики и алгоритмов реконструкции пространственных (трехмерных) моделей для решения задачи траекторного слежения за стыком и адаптивной коррекции параметров сварочного процесса.
5. Разработка методики и алгоритмов построения двумерных моделей протяженных сварных соединений, предназначенных для оценки качества и протоколирования процесса сварки.
6. Оценка эффективности предложенных алгоритмов и определение их параметров, обеспечивающих приемлемую точность реконструкции моделей сварных соединений при минимальной вычислительной сложности (максимальном быстродействии).
7. Определение траектории перемещения сварочной горелки при многослойной сварке кольцевых стыков труб большого диаметра.
8. Реализация разработанных алгоритмов в цифровой адаптивной системе управления сварочным процессом с целью подтверждения предложенных методик и алгоритмов.

Методы исследований. В процессе выполнения диссертационной работы использовались методы теории математического моделирования, теории автоматического управления, теории цифровой обработки информации и др.

Кроме того, использовались методы численного моделирования разработанных алгоритмов. При моделировании применялись пакеты прикладных программ Matlab-SimuLink.

Научная новизна работы.

В диссертационной работе получены новые научные результаты теоретического и прикладного характера:

1. Разработаны новые эффективные методики и алгоритмы реконструкции пространственных (трехмерных) моделей сварных соединений на основе данных лазерной профилометрии.
2. Предложены новые методики и алгоритмы построения двумерных моделей протяженных сварных соединений, позволяющие получать «развертки» изображений сварных швов с целью последующего визуального и автоматического контроля.
3. Проведена оценка эффективности алгоритмов построения компактных моделей протяженных сварных соединений и предложен способ настройки параметров алгоритмов, обеспечивающий приемлемую точность реконструкции моделей сварных соединений при минимальной вычислительной сложности (максимальном быстродействии).
4. Разработан прикладной алгоритм расчета траектории перемещения сварочной горелки при многослойной сварке кольцевых стыков труб большого диаметра с использованием пространственных моделей сборки стыкового соединения, полученных на основе сплайн-аппроксимации данных лазерной профилометрии.

Практическая значимость работы.

1. Разработанные методики и алгоритмы реконструкции пространственных (трехмерных) моделей сварных соединений на основе данных лазерной профилометрии могут быть использованы для решения задачи прецизионного наведения на стык сварочного оборудования (расчета траектории перемещения сварочной горелки), технологической адаптации сварочного оборудования и оценки качества сварного шва при апостериорной профилометрии.
2. Разработанные методики и алгоритмы построения двумерных моделей протяженных сварных соединений могут быть использованы для визуального и автоматического контроля качества сварных швов и компактного хранения данных видеомониторинга сварочных процессов.
3. Предложенный способ настройки параметров алгоритмов получения компактных моделей позволяет упростить процедуру проектирования программно-аппаратного обеспечения САУ ТП сварки.

Разработанные эффективные методики построения компактных моделей сварных соединений открывают новые возможности для повышения эффективности сварочного производства и могут быть использованы при создании адаптивных систем управления технологическим процессом сварки протоколирования сварочных процессов и решения задачи контроля качества сварных соединений.

Применение предложенных подходов в сварочной промышленности обеспечивает:

- снижение уровня брака при сварке стыков труб;
- увеличение производительности процессов сварки;
- повышение уровня вероятности обнаружения дефектов;
- требуемое качество сварки за счет снижения роли человеческого фактора.

Реализация результатов работы. Основной сферой использования полученных результатов являются автоматические системы управления сварочными процессами. Методики и алгоритмы построения компактных моделей протяженных сварных соединений, предназначенных для оценки качества и протоколирования процесса сварки, и процедура расчета траектории перемещения сварочной горелки при многослойной сварке кольцевых стыков труб большого диаметра использованы при создании цифровой адаптивной системы управления сварочным процессом на базе сварочной установки ГАСТ-1 НПП «Технотрон» с инверторным источником питания ДС 400.33 и модернизированной сварочной головкой «ГАСТ-1», оснащенной лазерным сканером профиля стыка и видеокамерой.

Положения, выносимые на защиту.

- Методики и алгоритмы реконструкции пространственных (трехмерных) моделей, предназначенные для решения задачи траекторного слежения за стыком, адаптивной коррекции параметров сварочного процесса и контроля качества сварных швов по данным априорной и апостериорной лазерной профилометрии.
- Методики и алгоритмы построения двумерных моделей протяженных сварных соединений, предназначенные для оценки качества и протоколирования процесса сварки.
- Результаты экспериментальных исследований, которые могут быть использованы для создания цифровых адаптивных систем видеомониторинга и управления сварочным процессом, полученные на базе сварочной установки ГАСТ-1 НПП «Технотрон» с инверторным источником питания ДС 400.33 и модернизированной сварочной головкой «ГАСТ-1», оснащенной лазерным сканером профиля стыка и видеокамерой.

Личный вклад автора. Все результаты диссертационной работы получены лично автором или при его непосредственном участии в результате выполнения экспериментальных и расчетных работ. Во всех необходимых случаях заимствования чужих результатов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

Достоверность полученных результатов и сделанных на их основании выводов обуславливается теоретической проработкой и инженерным анализом существующих подходов, использованием известных закономерностей и апробированных методик, соответствием методов исследования поставленным целям и задачам, сочетанием количественного и качественного анализа

результатов, применением современных методов статистической обработки данных, непротиворечивостью результатов.

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты диссертации представлялись, обсуждались и были приняты на научном семинаре кафедры систем автоматического управления ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также на международных симпозиумах и конференциях: XII студенческий научный вестник ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана «Студенческая научная весна» (Москва, 2012г), молодежный научно-технический вестник №12 ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2014г), VIII, IX, X, XI международные симпозиумы «Интеллектуальные системы» (Москва, 2008, 2010, 2012, 2014г), XVI международный симпозиум «Социогуманитарные аспекты глобального развития и роль инженерной деятельности в XXI веке» (Москва, 2014г).

Основное содержание диссертационной работы отражено в десяти статьях, из которых 2 опубликованы в изданиях, из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 155 наименований. Основная часть работы составляет 145 страниц машинописного текста, 11 таблиц и 80 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируется ее цель, научная новизна, приводятся полученные результаты, решенные практические задачи и структура работы.

В первой главе представлен обзор подходов к автоматизации сварки и возможности применения адаптивной системы управления в автоматизированных сварочных системах. Приведены технологические особенности автоматизированной сварки трубопроводов.

Сварка - технологический процесс получения неразъемных соединений материалов посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном или пластическом деформировании, или совместным действием того и другого. Сваркой соединяют однородные и разнородные металлы и их сплавы, металлы с некоторыми неметаллическими материалами (керамикой, графитом, стеклом и др.), а также пластмассы.

Наиболее распространен метод сварки трубопроводов термическими способами - дуговая сварка, при которой источником нагрева соединяемых кромок трубопроводов служит электрическая дуга между плавящимся электродом и кромками трубопроводов. При дуговой сварке порошковые проволоки имеют широкое промышленное применение. Конструкция порошковой проволоки определяет некоторые особенности ее расплавления дугой. Сердечник порошковой проволоки на 50 - 70% состоит из неметаллических материалов и поэтому его электросопротивление велико - в сотни раз больше, чем металлической оболочки. Поэтому практически весь

сварочный ток проходит через металлическую оболочку, расплавляя ее. Плавление же сердечника, порошковой проволоки, расположенного внутри металлической оболочки, происходит в основном за счет теплоизлучения дуги и теплопередачи от расплавляющегося металла оболочки. Ввиду этого сердечник может выступать из оболочки, касаться ванны жидкого металла или переходить в нее частично в нерасплавленном состоянии, как показано на (Рис.1).

Существуют две основные категории автоматизированной сварки:

– Полуавтоматическая сварка - процесс сварки, при котором электродная проволока подается с постоянной скоростью в зону сварки и одновременно в эту же зону поступает углекислый газ, аргон или другой газ, который обеспечивает защиту расплавленного или нагретого электродного и основного металлов от вредного воздействия окружающего воздуха, либо сварочный флюс.

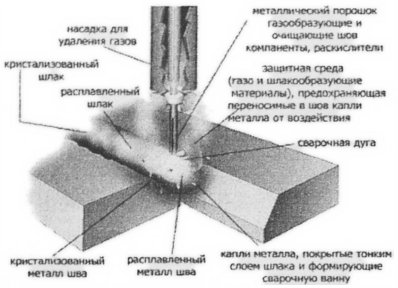


Рис. 1. Дуговая сварка порошковыми проволоками

– Полностью автоматическая сварка - процесс выполняемый сварочным роботом, либо целым набором роботов и машин, действующим по заданной программе, без непосредственного участия человека, при котором скорость подачи проволоки в зону сварки зависит от скорости ее плавления, а длинна дуги остается практически постоянной, что положительно влияет на качество сварочного соединения.

Во второй главе рассмотрены особенности применения систем технического зрения (СТЗ) на основе лазерной профилометрии в задачах геометрической и технологической адаптации сварочного оборудования. Система технического зрения (СТЗ) триангуляционного типа является бесконтактной и отличается высокой точностью, информативностью и надёжностью. Такие системы способны устойчиво работать при горящей сварочной дуге, обеспечивая все необходимые данные для автоматического слежения за стыком, а также для контроля качества шва по геометрическим характеристикам. В основу работы СТЗ положен метод светового сечения (Рис. 2.).

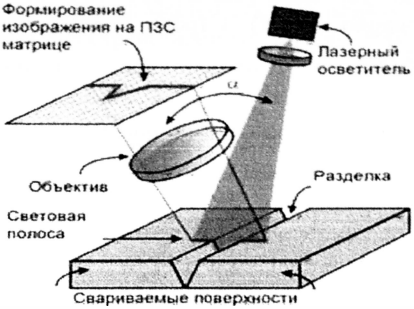


Рис. 2. Принцип работы профилометрической системы триангуляционного типа

Результаты лазерной профилометрии (Рис.3) позволяют определять геометрические параметры разделки стыка в системе координат сканера, связанной со сварочной головкой (Рис. 4).

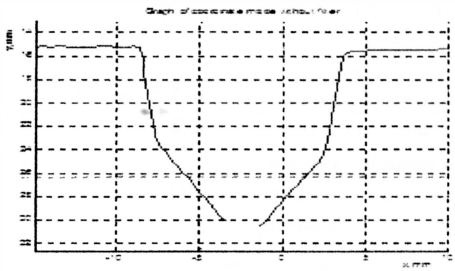


Рис. 3. Профиль стыка в угловом положении FR=75.4°,

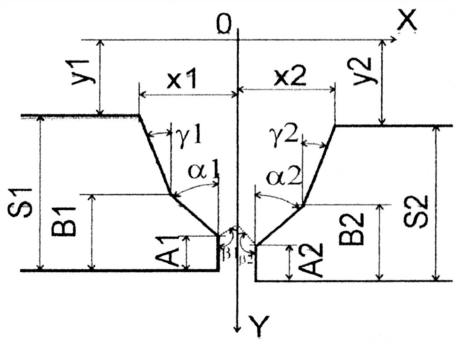


Рис. 4. Геометрические параметры разделки кромок и сборки.

Данные записываются через равные промежутки времени, задаваемые в программе (по умолчанию 1 сек). Строка данных имеет следующий вид, показанный в Таблице 1.

Таблица 1.

Формат строки выходного файла

№	Параметр	Обозначение	Пределы
1	Абсолютное время	ДД.ММ.ГГГГ ЧЧ: ММ: СС, XX Пример 06.11.2009 13:58:03,77	
2	Текущее угловое положение головки в градусах	FR	- 360…360,0
3	Текущий наклон трубы в градусах	BR	-45…45,0
4	Расстояние до края левой кромки	x1	-50…50,0
5	Расстояние до края правой кромки	x2	-50…50,0
6	Высота левой кромки	y1	0…100,0
7	Высота правой кромки	y2	0…100,0
8	Толщина левой кромки	S1	0…50,0
9	Толщина правой кромки	S2	0…50,0
10	Расстояние до начала перелома разделки левой кромки	B1	0…50,0
11	Расстояние до начала перелома разделки правой кромки	B2	0…50,0
12	Притупление левой кромки	A1	0…20,0
13	Притупление правой кромки	A2	0…20,0
14	Угол γ1 в градусах	γ1	0…40,0
15	Угол γ2 в градусах	γ2	0…40,0
16	Угол α1 в градусах	α1	0…40,0
17	Угол α2 в градусах	α2	0…40,0
18	Угол ß1 в градусах	ß1	0…150,0
19	Угол ß2 в градусах	ß2	0…150,0
20	Далее необязательно может следовать до 1024 пар значений (X, Y) профиля стыка.		X: -100…100,00 Y: 0…150,00
	Перевод строки.		

Также по изображениям профилей стыка в разных угловых положениях возможно восстановить пространственную модель стыка (Рис. 5) с целью решения задачи геометрической адаптации – определения траектории перемещения сварочной горелки, в том числе при многослойном заполнении разделки с перекрытием слоев (Рис. 6).

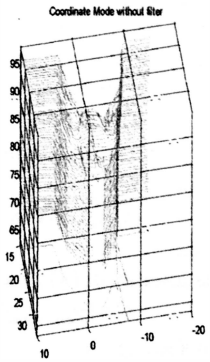


Рис. 5. Пространственная модель стыка при угловом положении 63,2-100,1 градусов.

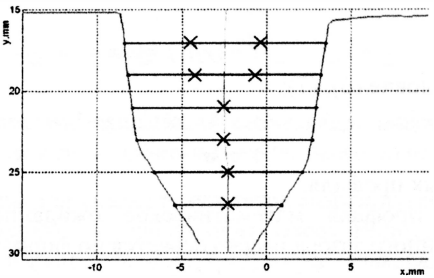


Рис. 6. Схема заполнения разделки при сварке с многослойным заполнением

Следует отметить, что существуют импульсные шумы, вызванные механическими колебаниями оборудования и эффектом переотражения света от кромок разделки стыка. Наличие импульсных шумов обуславливает необходимость предварительной обработки (фильтрации) данных. В работе исследованы подходы, основанные на медианной фильтрации, кусочно-линейной аппроксимации и сплайн-аппроксимации.

Помимо реконструкции пространственной модели стыка с целью решения задачи геометрической адаптации, сплайн-аппроксимация также дает возможность оценить качество сварного соединения по его геометрическим свойствам.

Каждый профиль стыка можно описать функцией сплайна степени k (1):

$$S_{\Delta}(Y;x_i)=y_i, \quad (1)$$

которая имеет непрерывные производные до k-1 включительно на отрезке $[x_0, x_N]$ и на каждом из отрезков $[x_{i-1}, x_i]$ равна многочлену степени k. В работе применяется кубический сплайн (k=3) на основе которого строится модель сварного шва. Оценка качества производится путем расчета дисперсии точек поверхности заполненного зазора, что позволяет обнаружить такие дефекты, как смещение валика относительно стыка, неравномерность заполнения разделки металлом, чешуйчатость и др. Решение задачи может быть получено путем определения экстремумов в соответствии с уравнением:

$$S'_{\Delta}(Y;x)=0, \quad (2)$$

Решив уравнение (2) и подставив решения в формулу (1), получаем экстремумы данной модели сплайна (3):

$$(x_i, y_i), i=1...m \ , \quad (3)$$

где m - число решений уравнения.

Таким образом, получаем диапазон (4) для расчета дисперсии;

$$C=[y_{\min}, y_{\max}] \quad (4)$$

где $y_{\min}=\min(y_1,...,y_m)$, и $y_{\max}=\min(y_1,...,y_m)$.

На основе профилометрических данных для каждого профиля рассчитываем математическое ожидание и дисперсию в диапазоне C. Допустим, что Y является подмножеством массива данных профиля, находящимся в диапазоне C (5):

$$Y=\{y_j\}, j=1...n \quad (5)$$

и удовлетворяется условие (6), (7);

$$y_{\min} \le y_j \le y_{\max}, j=1...n \quad (6)$$

$$Y \subset M \quad (7)$$

где М – массив данных профиля.

Для каждого профиля математическое ожидание координат точек поверхности заполненного зазора рассчитывается по формуле (8).

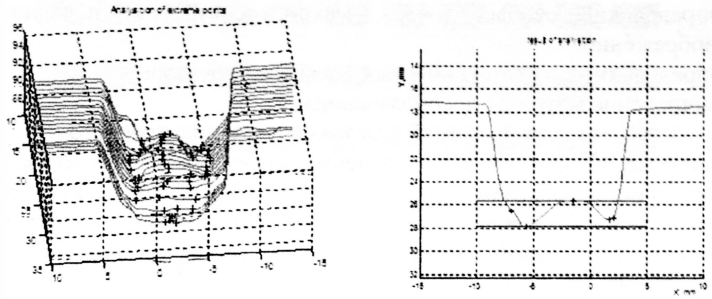
$$\overline{y}=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} y_j \quad (8)$$

Дисперсия координат точек поверхности заполненного зазора определяется по формуле (9);

$$D_y=\sigma_y^2=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(y_j-\overline{y})^2 \quad (9)$$

где σ_y - среднеквадратическое отклонение.

Данный алгоритм анализа результатов сварки реализован в среде Matlab 2010a (version 7.10.0.499), результаты моделирования для участка шва в угловом положении с $87{,}5^\circ$ по $96{,}6^\circ$ представлены на (Рис. 7.а). Экстремумы на поверхности шва показаны на (Рис. 7.б) приведен пример определения диапазона дисперсии точек поверхности шва.



а б

Рис. 7(а) Экстремумы на поверхности заполненного зазора, (б) Диапазон для расчета математической дисперсии

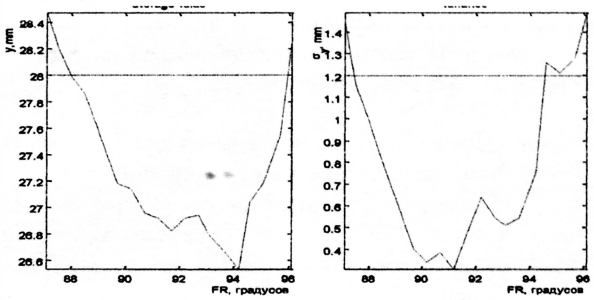


Рис. 8. Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение в зависимости от орбитального углового положения

На (Рис. 8) приведен анализ результатов сварки путем расчета дисперсии координат точек поверхности заполненного зазора. Видно, что математическое ожидание находится в диапазоне $26,5 \le \bar{y} \le 28$ а среднеквадратическое отклонение находится в диапазоне $0 \le \sigma_y \le 1,2$ что соответствует геометрической форме сварного шва, обеспечивающей надлежащее качество сварных соединений магистральных трубопроводов.

В третьей главе приведены результаты исследований алгоритмов построения цифровых изображений протяженных сварных соединений на основе данных видеомониторинга. Алгоритм формирования цифрового изображения протяженного сварного соединения основан на методах определения масштабно-инвариантных характеристик в последовательностях изображений и предполагает выполнение следующих основных процедур:

1. Получение последовательности кадров изображения сварного соединения и предварительная обработка.
2. Определение особых точек (дескрипторов) двух последовательных изображений.

3. Определение особых точек (дескрипторов) двух последовательных изображений.
4. Определение соответствий между особыми точками.
5. Вычисление матрицы преобразования.
6. Сопоставление изображений с целью получения итогового.

Приведен обзор методов определения характерных точек на изображении. Среди всего многообразия детекторов характерных точек на изображении наибольшее распространение на сегодняшний день получили следующие:

1. Харриса и его модификации: Ши-Томаса, Харриса-Лапласа и др.;
2. Фёрстнера;
3. Бедета;
4. Алгоритмы SIFT, SURF, PCA-SIFT;
5. DoG (DifferenceofGaussian);
6. Алгоритм Хафа и его модификации (Радон, Хартли) для поиска линий;
7. Алгоритм Рада для поиска окружности и другие.

В Таблице 2 приведены результаты оценки эффективности исследованных алгоритмов на основе данных видеомониторинга.

Таблица. 2.

Оценка эффективности алгоритмов построения цифровых изображений протяженных сварных соединений

Метод	Быстро-действие	Инвариант-ность к масштабиро-ванию	Инвариант-ность к повороту	Инвариант-ность к размытию	Инвариант-ность к освещен-ности
SIFT	Низкое	Высокое	Высокое	Высокое	Низкое
PCA-SIFT	Среднее	Низкое	Среднее	Низкое	Среднее
SURF	Высокое	Среднее	Низкое	Среднее	Высокое

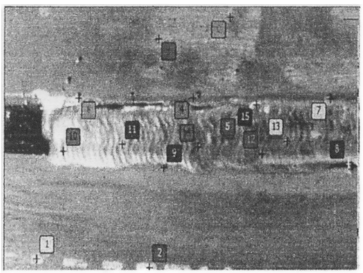
Заключительный этап получения развертки изображений предполагает выполнение следующих процедур:

1. По заданным параметрам (частоте кадров, орбитальному углу, диаметру трубы, скорости сварки) определяется линейный размер итогового изображения.
2. Первое изображение без изменения копируется в плоскость итогового.
3. Второе изображение накладывается на плоскость первого с помощью полученной матрицы преобразования.
4. Общая часть восстанавливается с помощью линейной интерполяции.

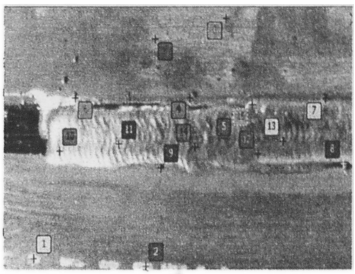
Кадры исходной видеопоследовательности представлены на Рис. 9.

Рис. 9. Исходные изображения

На Рис. 10 представлены характерные точки и их соответствия на двух последовательных кадрах.



а)



б)

Рис. 10. Характерные точки изображений

Координаты характерных точек на двух изображениях приведены в Таблице 3. Важным параметром является расстояние, характеризующее, насколько хорошо будет произведено совмещение изображений по данной характерной точке (Таблица 3, столбец 4). Оптимальным считается значение от 0 до 5.

Таблица 3.

Характерные точки изображений

№ п/п	Координаты(рис.11а)	Правая координата	Расстояние
0	(997, 27)	(1111, 33)	1.90031
1	(1125, 46)	(1236, 52)	3.6298
2	(874, 412)	(996, 414)	3.8763
3	(918, 180)	(1034, 184)	1.74669
4	(782, 485)	(905, 487)	1.66231
5	(565, 23)	(684, 27)	2.43866

Таблица 3(продолжение)

6	(702, 46)	(820, 51)	1.28584
7	(615, 441)	(741, 444)	3.07681
9	(825, 116)	(943, 120)	2.65011
10	(887, 35)	(1003, 39)	1.18735
11	(1007, 497)	(1125, 499)	5.39345
12	(330, 387)	(452, 390)	2.89786

Оценки эффективности алгоритмов построения изображения протяженных сварных соединений в зависимости от частоты кадров представлена в Таблице 4. С увеличением числа кадров уменьшается ошибка и увеличивается коэффициент корреляции между изображениями (Таблица 4).

Таблица 4.

Оценка эффективности алгоритмов построения изображения протяженных сварных соединений в зависимости от частоты кадров

Частота кадров, Кадр/с	Время склейки, С	Среднее отклонение $\frac{1}{M \times N}\sum(I_{ij}^1 - I_{ij}^2)$	Суммарная среднеквадратичная ошибка $\frac{1}{M \times N}\sum(I_{ij}^1 - I_{ij}^2)^2$	Нормализованная корреляционная функция
0.4	2.68	14.6551	98.9773	0.2039
0.6	3.8	10.0138	76.6243	0.5887
1	6.5	8.4563	70.0474	0.6958
2	13	9.1965	73.559	0.6382
4	30	6.2693	60.0789	0.8702
6	65	8.4671	64.2511	0.6141
8	68	5.9888	56.068	0.8556
10	90	6.4157	57.5099	0.8214
12	105	3.9201	35.6101	0.9388
14	133	5.7467	50.1696	0.8329
16	151	5.256	46.5286	0.8666
18	179	4.6709	40.7973	0.8847
20	216	6.3569	53.8587	0.7753
22	295	6.2846	54.5616	0.7947
24	364	-	-	-

Результаты формирования цифрового изображения (развертки) участка сварного соединения кольцевого стыка длиной 215 мм с привязкой к орбитальному углу представлены (на Рис. 11). Развертка получена в результате видеокомпьютерного мониторинга сварного соединения в диапазоне орбитальных углов 0-20 градусов путем объединения 120-ти кадров видеопоследовательности.

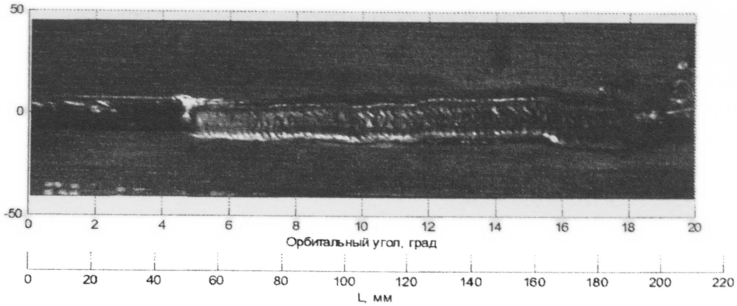


Рис. 11. Развертка поверхности сварного шва кольцевого стыка.

В заключении приведены основные выводы и результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты работы:

1. Проведено обоснование возможности применения данных лазерной профилометрии и видеомониторинга для решения задачи построения компактных моделей сварных соединений.
2. Разработаны методики и алгоритмы реконструкции пространственных (трехмерных) моделей для решения задачи траекторного слежения за стыком и адаптивной коррекции параметров сварочного процесса.
3. Предложены методики и алгоритмы построения двумерных моделей протяженных сварных соединений, предназначенных для оценки качества и протоколирования процесса сварки.
4. Проведена оценка эффективности предложенных алгоритмов и определены их параметры, обеспечивающие приемлемую точность реконструкции моделей сварных соединений при минимальной вычислительной сложности (максимальном быстродействии).
5. Эффективность разработанных методик, процедур и алгоритмов подтверждена результатами моделирования цифровой адаптивной системы управления сварочным процессом на базе сварочной установки ГАСТ-1 НПП «Технотрон» с инверторным источником питания ДС 400.33 и модернизированной сварочной головкой «ГАСТ-1», оснащенной лазерным сканером профиля стыка и видеокамерой.

Тема и содержание диссертации отражены в следующих научных работах:

1. **Адаптивная система управления сварочным оборудованием / Ситу Аунг Со [и др.] Инженерный вестник Дона. 2014. №2- http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2385 Загл. с экрана. – Яз. Рус. (0,437п.л./0,145п.л.).**

2. Гаврилов А.И., Ситу Аунг Со. Реконструкция трехмерных моделей сварочных соединений по данным лазерной профилометрии // Интеллектуальные системы: Труды одиннадцатого международного симпозиума. М.: РУСАКИ, 2014. С. 185-191. (0,437п.л./0,218п.л.).
3. Классификатор сварочных дефектов / Ситу Аунг Со [и др.] Студенческий научный вестник. –М. :МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. Том XII, Часть-1. С. 35-38. (0,25п.л./0,06п.л.).
4. Нейросетевой классификатор сварочных дефектов / Ситу Аунг Со [и др.] Интеллектуальные системы: Труды девятого международного симпозиума. –М.: РУСАКИ, 2010. С. 614-615. (0,125п.л./0,062п.л.).
5. Нейросетевые технологии в задаче управления электроприводом постоянного тока / Ситу Аунг Со. [и др.] Интеллектуальные системы: Труды восьмого международного симпозиума. –М.: РУСАКИ, 2008. С. 635-638. (0,25п.л./0,062п.л.).
6. Применение нейросетевых технологий в задачах обнаружения дефектов сварного шва / Ситу Аунг Со [и др.] Молодежный научно-технический вестник #12. –М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. http://sntbul.bmstu.ru/file/out/751910 (0,437п.л./0,109п.л.).
7. **Применение технологи й цифровой обработки изображений в нейросетевых системах управления сварочным оборудованием / Ситу Аунг Со [и др.] Науковедение. Интернет-журнал Том 7, №1, 2015. http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-1. (0,75п.л./0,15п.л.).**
8. Профилометрическая система позиционирования сварочной установки / Ситу Аунг Со [и др.] Интеллектуальные системы: Труды девятого международного симпозиума. –М.: РУСАКИ, 2010. С. 659-662. (0,25п.л./0,046п.л.).
9. Реконструкция трёхмерных моделей по данным лазерной профилометрии / Ситу Аунг Со [и др.] Интеллектуальные системы: Труды десятого международного симпозиума. –М.: РУСАКИ, 2012. С. 513-517. (0,312п.л./0,062п.л.).
10. Ситу Аунг Со. Профилометрическая система реконструкции пространственных моделей кольцевых стыков // Социогуманитарные аспекты глобального развития и роль инженерной деятельности в XXI веке: XVI Международный симпозиум. –М. 2014. С. 405-409. (0,312п.л./0,312п.л.).