

На правах рукописи

АНДРОСОВ Алексей Юрьевич



ТРАССИРОВКА ДВИЖЕНИЙ ОПЕРАТОРА В ТРЕНАЖЕРАХ

Специальность:

**05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации
(в промышленности)**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Тула 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет».

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
ЛАРКИН Евгений Васильевич

Официальные оппоненты: Ерёменко Владимир Тарасович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И. С. Тургенева», г. Орёл
заведующий кафедрой

Привалов Александр Николаевич
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ТГПУ им. Л. Н. Толстого», г. Тула
профессор кафедры

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет»

Защита состоится 19 марта 2019 г. на заседании диссертационного совета Д 212.271.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, ул. Агеева, д. 1Б, аудитория 12-105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92 и на сайте. http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-05/Androsov_AY/

Автореферат разослан 25 января 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Соколова Марина
Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Современный этап развития управляемой техники характеризуется сложностью выполняемых ею функций, что требует от оператора устойчивых навыков управления оборудованием. С другой стороны относительно высокая сложность и стоимость оборудования, дороговизна энергоносителей и расходных материалов делает проблематичным обучение операторов на натуральных объектах, что предопределяет широкое внедрение тренажерной техники, а также технологий обучения, и позволяет доводить степень подготовленности операторов до требуемого для практической работы уровня в сжатые сроки.

Любой тренажер представляет собой техническую систему, которая с высокой точностью воспроизводит рабочее место оператора с тем же самым пространственным расположением индикаторов и органов управления относительно оператора, что и в реальном объекте. Подобное расположение позволяет на этапе обучения отработать моторную реакцию оператора на срабатывание индикатора, т.е. манипуляции с одним органом управления или перемещение человеческих исполнительных органов от одного органа управления до другого. Моторная реакция является важной составляющей реакции оператора, вообще, занимающей достаточно большой (до 50%) отрезок времени. Длительность моторной реакции определяется двумя факторами, индивидуальными психофизиологическими особенностями оператора и траекторией (трассой), по которой движется рабочий орган. Если влияние первого фактора почти не поддается коррекции, то трассы движения отдельных частей органа могут быть исправлены в процессе обучения, и доведены до траектории соответствующих движений идеального, или эталонного оператора. Для этого на основании объективного контроля необходимо выявление структурных ошибок в движениях органов обучаемого оператора, идентификация его неуверенных действий, приводящих при, в общем правильном алгоритме работы с оборудованием, к потере времени на исполнение принятых решений. Это, в свою очередь, приводит к необходимости оборудования тренажеров техническими средствами, позволяющими определить положение органов обучаемого оператора в пространстве/времени, и программное обеспечение, позволяющее оценить степень приближенности движений к эталонной моторной реакции идеального оператора.

Вопросы объективного контроля моторной реакции обучаемого оператора и определения степени соответствия движения движению эталонного оператора в настоящее время проработаны недостаточно, что и объясняет необходимость и **актуальность** настоящей работы.

Таким образом, **объектом исследования** является техническая подсистема тренажера, позволяющая проводить трассировку движения органов обучаемого оператора при манипуляции с имитаторами органов управления, и оценивать степень его соответствия трассе идеальной траектории движения.

Предметом исследования является конфигурация системы и методы обработки информации, поступающей с сенсоров, для точного описания трассы движения.

Различными аспектами тренажеростроения и обеспечения подобия занимались: П.М.Алабужев, В.Б.Геронимус, В.А.Веников, М.В.Кирпичев, А.С. Бабенко, В.А.Боднер, Р.А.Закиров, В.С.Шукшунов и др. Общей теорией обработки одномерных и двумерных сигналов занимались Б.А.Алпатов, Р.Гонсалес, Г.Н.Грязин, В.В.Еремеев, В.К.Злобин, Ю.Б.Зубарев, Г.П. Катус, А.Папулис, У.Прэтт, В.С.Титов, Л.П.Ярославский и др.

В диссертации использован подход, к построению трассы движения, основанный на **аналитических методах** математического моделирования. Математические модели, разработанные в рамках использованного подхода, базируются на теории систем, теории сигналов, теории подобия, теории проекционной оптики, аналитической геометрии, теории функций чувствительности и теории принятия решений.

Цель работы заключается в выработке рекомендаций по конфигурированию технических средств системы построения трассы движения обучаемого оператора и в разработке методов создания программного обеспечения, обеспечивающего построение трассы движения органов оператора в тренажерной технике.

В соответствии с поставленной целью в диссертации решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ технических средств дистанционной оценки пространственного местоположения объектов, а также типов фотоэлектронных преобразователей, сделан вывод о целесообразности использования оптических средств контроля и измерения с применением приборов ССD-типа и построена модель оценки фотометрических параметров сцены с разложением на цветовые составляющие.

2. Построена цифровая модель сцены и проведена оценка ее точности, включающая оценку точности определения местоположения цветовых составляющих пикселя и точность квантования по уровню цветовых составляющих.

3. На основании анализа методов идентификации пикселей, относящихся к образу маркера, сделан вывод о целесообразности применения метода амплитудно-цветовой дискриминации.

4. Сформулировано решающее правило амплитудно-цветовой дискриминации при выделении образа маркера из цифровой модели сцены с разделением на цветовые составляющие.

5. Разработан метод расчета пространственных координат маркера по результатам оценки координат бинарного образа маркера.

6. Произведена оценка инструментальной погрешности системы трассировки движения в целом в зависимости от точности установки TV-модулей.

7. Произведена оценка инструментальной погрешности перекоса данных видеопотока.

8. Оценена величина «смаза» изображения в зависимости от составляющих скорости перемещения маркера.

9. Разработан метод аппроксимации трассы системой квадратичных парабол с масштабированием по времени.

Достоверность полученных теоретических результатов подтверждается корректным применением аналитических моделей и экспериментом, поставленным на двухмодульной системе трассировки.

Положения, выносимые на защиту, обладающие **научной новизной**.

1. Метод построения цифровой модели сцены с разделением пикселей на цифровые составляющие, отличающийся тем, что при построении модели учтены реальное физическое расположение пикселей на матричном фоточувствительном приборе с зарядовой связью, что позволяет повысить точность оценки координат маркера.

2. Решающее правило амплитудно-цветовой дискриминации, отличающееся тем, что в цветовом пространстве проверяется попадание изображающего вектора в конус, ограниченный допусками на длины волн и общей интенсивностью светового потока, что позволяет использовать амплитудно-цветовой контраст для выделения пикселей, относящихся к образу маркера.

3. Метод оценки близости трасс движения обучаемого и эталонного оператора, отличающийся введением промежуточной операции масштабирования по времени, что позволяет исключить из оценки психофизиологической фактор и оценивать только точность движения.

Практическая ценность. Разработанные методы трассировки движения снижают трудоемкость разработки тренажерных систем, включающих подсистемы трассировки движения, повышают качество проектирования за счет снижения объемов экспериментальных работ, а также позволяют повысить точность разрабатываемых подсистем.

Реализация и внедрение результатов. Предложенные в диссертации методы и методики реализованы автором в ОАО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения» и внедрены в учебный процесс кафедры «Робототехника и автоматизация производства» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» при преподавании следующих дисциплин: «Основы информационных устройств роботов», «Основы технического зрения и цифровой обработки изображений» и ФГКОУ ВО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации» при преподавании следующих дисциплин: «Основы построения видеосистем и передачи видеoinформации», «Боевое обеспечение» (акты прилагаются).

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах.

1. Всероссийская научно-техническая конференция. Управление параллельными и распределенными информационными процессами: Тула, 2014.

2. XXXII Научная сессия, посвященная Дню радио. – Тула: НТО РЭС им. А.С. Попова, 2014.

3. Проблемы наземной радиолокации. X Всероссийская научно – техническая Интернет – конференция. – Тула: 2014.

4. Ежегодная научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ. – Тула 2014 - 2016 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 работы, включенных в список литературы, в том числе: 14 статей в сборниках, рекомендуемых ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, изложенных на 155 страницах, включающих 41 рисунок и 3 таблицы, заключения, библиографического списка, включающего 196 наименований, и приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цели и основные научные задачи диссертационной работы, дано краткое изложение полученных результатов по основным разделам.

В первой главе проведен системный анализ методов и технических средств, которые могут быть использованы для оценки пространственного положения объектов; выбраны технические средства, использующие электромагнитное излучение в видимой части спектра, как наиболее простые в разработке и эксплуатации.

Функциональная схема системы приведена на рис. 1, где показаны N TV-модулей TV-1, ..., TV- n , ..., TV- N и наблюдаемый маркер K , местоположение которого определяется вектором $V_K = (x_K, y_K, z_K)$. Расположение n -го TV-модуля в Земной системе координат определяется вектором $V_n = (x_n, y_n, z_n)$, он повернут относительно осей $xOyz$ Земной системы координат следующим образом: сначала проведен поворот на угол азимута ψ_n вокруг оси z ; затем, вокруг нового расположения оси Y'_n проведен поворот на угол места ϑ_n ; затем, вокруг нового расположения оси X_n проведен поворот на угол крена γ_n .

Аппаратные средства n -го TV-модуля осуществляют следующее преобразование информации:

$$[D_{Y(n),Z(n)}] = \Phi_{ADC}(\Phi_e(\Phi_o[E'(x, y, z)])) = \Phi_H[E'(x, y, z)],$$

где Φ_o – функциональное преобразование оптического тракта; Φ_e – функция фотоэлектронного преобразования; Φ_{ADC} – функция аналого-цифрового преобразователя; $[D_{Y(n),Z(n)}]$ – цифровой моделью изображения (ЦМИ). Вследствие того, что современные фотоэлектронные преобразователи, как правило, снабжены светофильтрами, формирующими сигнал в «красной» ($\lambda_R \cong 0,6$ мкм), «зеленой» ($\lambda_G \cong$

0,53 мкм) и «синей» ($\lambda_B \cong 0,45$ мкм) областях спектра, ЦМИ представляется в виде объединения трех моделей:

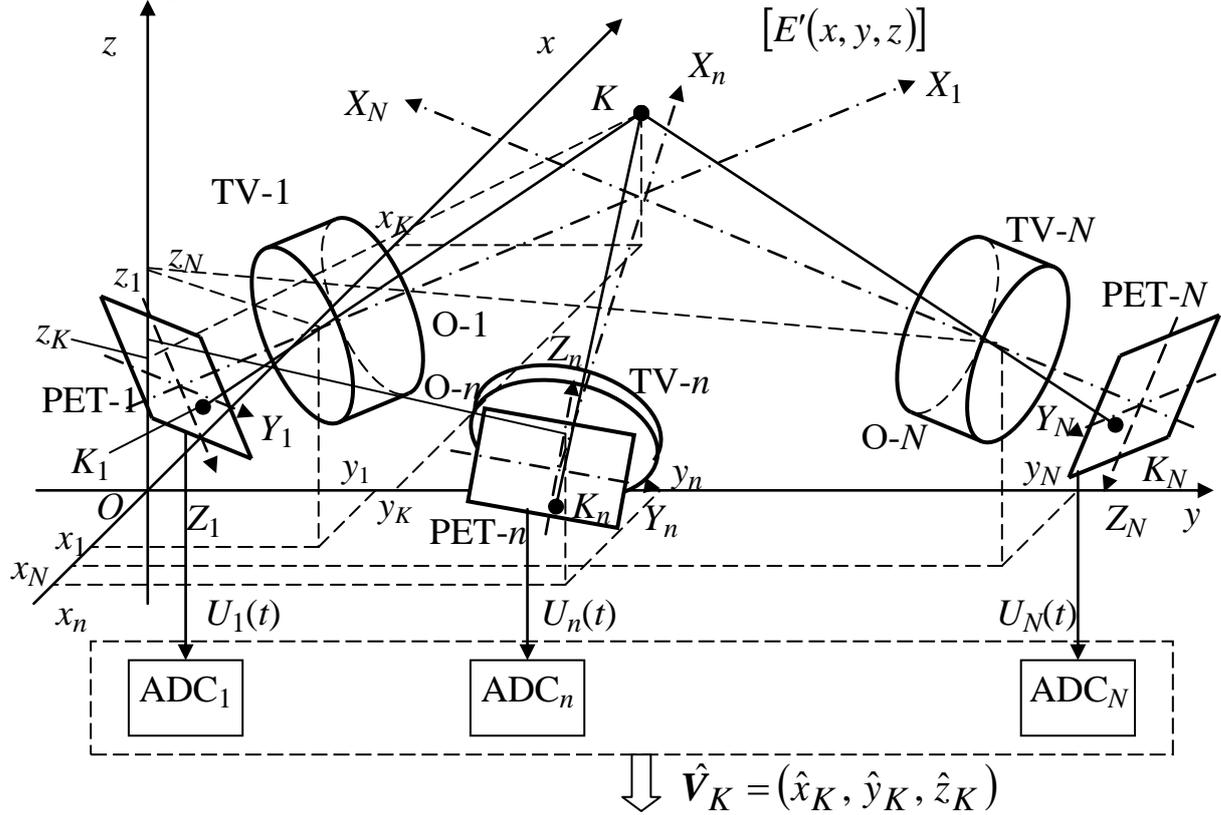


Рис. 1. Функциональная схема системы дистанционного бесконтактного измерения пространственных координат объекта

$$[D_{Y(n),Y(n)}] = [D_{Y(n),Y(n)}]_{RGB} = [D_{Y(n),Y(n)}]_R \cup [D_{Y(n),Y(n)}]_G \cup [D_{Y(n),Y(n)}]_B.$$

Оценки координат точки K в трехмерном пространстве формируются как функции

$$\begin{cases} \hat{x}_K = \varphi_x \left\{ [D_{Y(1),Z(1)}], \dots, [D_{Y(n),Z(n)}], \dots, [D_{Y(N),Z(N)}] \right\}, \\ \hat{y}_K = \varphi_y \left\{ [D_{Y(1),Z(1)}], \dots, [D_{Y(n),Z(n)}], \dots, [D_{Y(N),Z(N)}] \right\}, \\ \hat{z}_K = \varphi_z \left\{ [D_{Y(1),Z(1)}], \dots, [D_{Y(n),Z(n)}], \dots, [D_{Y(N),Z(N)}] \right\}, \end{cases} \quad (1)$$

Проведен анализ твердотельных фотоэлектронных преобразователей двух типов: CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductors) и CCD (Charge-Coupled Device). Показано, что при наблюдении движущихся объектов aberrации в преобразователях указанных типов различны. В приборах CMOS aberrации носят характер геометрических искажений, причем в зависимости от направления движения маломерных объектов и сканирования фотоэлектронного преобразователя возможны невосполнимые потери информации. В приборах CCD aberrации носят характер «смаза» изображения, последствия которого могут быть исправлены за счет программной обработки ЦМИ. В связи с этим даны рекомендации по использованию в системах трассировки TV-модулей на базе преобразователей CCD типа.

Показано, что значения функций (1) в различные моменты времени позволяет построить кривую движения обучаемого оператора. Оценка близости кривых

$$\bar{\varepsilon} = \int_{t=0}^{t_{\max}} \left\{ [\xi_{xK}(t, \mathbf{a}_x) - \zeta_{xK}(t)]^2 + [\xi_{yK}(t, \mathbf{a}_y) - \zeta_{yK}(t)]^2 + [\xi_{zK}(t, \mathbf{a}_z) - \zeta_{zK}(t)]^2 \right\} dt, \quad (2)$$

где $x = \xi_{xK}(t, \mathbf{a}_x)$; $y = \xi_{yK}(t, \mathbf{a}_y)$; $z = \xi_{zK}(t, \mathbf{a}_z)$ – уравнение траектории движения обучаемого оператора; $x = \zeta_{xK}(t)$, $y = \zeta_{yK}(t)$, $z = \zeta_{zK}(t)$ – уравнение траектории движения эталонного оператора; $\mathbf{a}_x, \mathbf{a}_y, \mathbf{a}_z$ – векторы параметров, дает информацию по коррекции моторной реакции обучаемого оператора.

Во второй главе построена модель преобразования информации, поступающей от сцены, и показано, как оценивается положение маркера относительно других предметов сцены.

Показано, что освещенности, создаваемые маркером K и другими предметами сцены L на поверхности фотоэлектронного преобразователя, с учетом малости угла между главной оптической осью объектива и направлением на соответствующие точки, равны

$$E'_{K'} = \kappa^2 \hat{\kappa} \int_{\lambda} \iint_{y_A^2 + z_A^2 \leq r^2} \iota_K(x_A = 0, y_A, z_A, x_K, y_K, z_K) dy_A dz_A \kappa_{\Phi}(\lambda) d\lambda;$$

$$E'_{L'} = \kappa^2 \hat{\kappa} \int_{\lambda} \iint_{y_A^2 + z_A^2 \leq r^2} \iota_L(x_A = 0, y_A, z_A, x_L, y_L, z_L, \lambda) dy_A dz_A \kappa_{\Phi}(\lambda) d\lambda.$$

где $\iota_L(x_A = 0, y_A, z_A, x_L, y_L, z_L, \lambda)$ – индикатриса рассеяния точки поверхности предмета сцены; $\iota_K(x_A = 0, y_A, z_A, x_K, y_K, z_K)$ – индикатриса излучения маркера; $x_A = 0, y_A, z_A$ – координаты точки A , принадлежащей поверхности входного зрачка объектива; r – радиус объектива; x_K, y_K, z_K и x_L, y_L, z_L – координаты точки, принадлежащей маркеру и предмету сцены, соответственно; $\kappa_{\Phi}(\lambda)$ – коэффициент пропускания светофильтра, зависящий от длины волны λ воспринимаемого светового потока; κ – коэффициент увеличения оптической системы; $\hat{\kappa}$ – коэффициент пропорциональности.

Построена модель накопления заряда под действием света в CCD-приборе, и показано, что фоточувствительный элемент CCD-прибора является интегрирующим звеном, как в пространственной, так и во временной области, что существенно уменьшает уровень помех и создает явление «смаза» изображения. Определен выходной сигнал на выходе фотоэлектронного преобразователя:

$$U_{(R,G,B),(K,L)} = \kappa_U \int_{-\beta}^{\beta} \int_{-\beta}^{\beta} \int_0^{\tau_i} E'_{(R,G,B),(K,L)}[Y, Z, t] dt dZ dY,$$

где $E'_{(R,G,B),(K,L)}[Y, Z, t]$ – освещенность фотоэлектронного преобразователя в красной R , зеленой G и синей B областях спектра, если на него попадет световой поток от маркера K или других предметов L сцены; Y, Z – горизонтальная и вертикальная координата, системы координат, связанной с фотоэлектронным преобразователем; κ_U – коэффициент пропорциональности; $2\beta \times 2\beta$ – размеры фоточувствительной ячейки; τ_i – время накопления заряда.

Построена модель CCD в целом как дискретизатора, и определены периоды дискретизации в цветовых плоскостях R, G, B :

Показано, что дискретная модель изображения сцены принимает вид:

$$U_{RK,L} = \kappa_U \sum_{j_t=0}^{\infty} \sum_{j_R=0}^{J_R-1} \sum_{m_R=0}^{M_R-1} \delta \left[Y - \Delta_{YR} \left(m_R - \frac{M_R}{2} \right) \right] \cdot \delta \left(Z - \Delta_{ZR} \left(j_R - \frac{J_R}{2} \right) \right) \cdot \delta(t - j_t \tau_{\bar{a}}) \cdot$$

$$\int_{\Delta_{ZR} \left(j_R - \frac{J_R}{2} \right) + \beta}^{\Delta_{ZR} \left(j_R - \frac{J_R}{2} \right) + \beta} \int_{\Delta_{YR} \left(m_R - \frac{M_R}{2} \right) + \beta}^{\Delta_{YR} \left(m_R - \frac{M_R}{2} \right) + \beta} \int_{j_t \tau_{\bar{a}} + \tau_i}^{j_t \tau_{\bar{a}} + \tau_i} E'_{RK'L'}[Y, Z, t] dt dZ dY;$$

$$\int_{\Delta_{ZR} \left(j_R - \frac{J_R}{2} \right) - \beta}^{\Delta_{ZR} \left(j_R - \frac{J_R}{2} \right) - \beta} \int_{\Delta_{YR} \left(m_R - \frac{M_R}{2} \right) - \beta}^{\Delta_{YR} \left(m_R - \frac{M_R}{2} \right) - \beta} \int_{j_t \tau_{\bar{a}}}^{j_t \tau_{\bar{a}}} E'_{RK'L'}[Y, Z, t] dt dZ dY;$$

$$\begin{aligned}
U_{GK,L} &= \kappa_U \sum_{j_t=0}^{\infty} \sum_{j_G=0}^{J_G-1} \sum_{m_G=0}^{M_G-1} \delta \left[Y - \Delta_{YG} \left(m_G - \frac{M_G}{2} \right) \right] \cdot \delta \left(Z - \Delta_{ZG} \left(j_G - \frac{J_G}{2} \right) \right) \cdot \delta(t - j_t \tau_{\ddot{a}}) \cdot \\
&\quad \int_{\Delta_{ZG} \left(j_G - \frac{J_G}{2} \right) + \beta}^{\Delta_{ZG} \left(j_G - \frac{J_G}{2} \right) - \beta} \int_{\Delta_{YG} \left(m_G - \frac{M_G}{2} \right) + \beta}^{\Delta_{YG} \left(m_G - \frac{M_G}{2} \right) - \beta} E'_{GK'L'} [Y, Z, t] dt dZ dY; \\
Y_{BK,L} &= \kappa_U \sum_{j_t=0}^{\infty} \sum_{j_B=0}^{J_B-1} \sum_{m_B=0}^{M_B-1} \delta \left[Y - \Delta_{YB} \left(m_B - \frac{M_B}{2} \right) \right] \cdot \delta \left(Z - \Delta_{ZB} \left(j_B - \frac{J_B}{2} \right) \right) \cdot \delta(t - j_t \tau_{\ddot{a}}) \cdot \\
&\quad \int_{\Delta_{ZB} \left(j_B - \frac{J_B}{2} \right) + \beta}^{\Delta_{ZB} \left(j_B - \frac{J_B}{2} \right) - \beta} \int_{\Delta_{YB} \left(m_B - \frac{M_B}{2} \right) + \beta}^{\Delta_{YB} \left(m_B - \frac{M_B}{2} \right) - \beta} E'_{BK'L'} [Y, Z, t] dt dZ dY,
\end{aligned}$$

где индексы $j_R, m_R, j_G, m_G, j_B, m_B$ зависят от того, какая цветовая плоскость рассматривается; $\delta(\dots)$ – δ -функция Дирака; $\Delta_{\dots}(\dots)$ – функция преобразования дискретных координат в линейные с учетом аббераций.

Индексы принимают значения:

$$\text{для цветовой плоскости } R - \begin{cases} m_R = 2l_m + 1; \\ j_R = 2l_j; \end{cases} l_m, l_j \in \left\{ 0, 1, 2, \dots, \frac{M}{2} - 1 \right\};$$

для цветовой плоскости G –

$$\begin{cases} m_G = 2l_m, \text{ если } j_G \in \{0, 2, \dots, J-2\}; \\ m_G = 2l_m + 1, \text{ если } j_G \in \{1, 3, \dots, J-1\}; \\ j_G \in \{0, 1, 2, \dots, J-1\}. \end{cases} l_m, l_j \in \left\{ 0, 1, 2, \dots, \frac{M}{2} - 1 \right\};$$

$$\text{для цветовой плоскости } B - \begin{cases} m_B = 2l_m; \\ j_B = 2l_j + 1; \end{cases} l_m, l_j \in \left\{ 0, 1, 2, \dots, \frac{M}{2} - 1 \right\}.$$

По результатам дискретизации сформирована модель цветowych плоскостей, которая имеет вид (рис. 2).

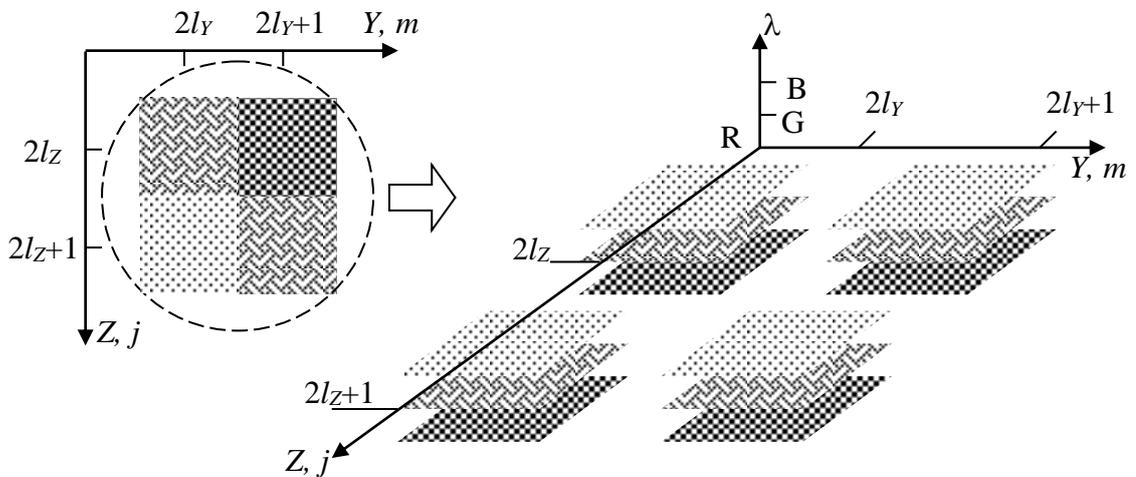


Рис. 2. Преобразование результатов дискретизации в модель цветowych плоскостей

амплитудно-цветовой дискриминации позволяет отсеять пиксели, относящиеся к образу фона, так как они лежат вне цветового конуса. В результате этого получены решающие правила идентификации пикселей маркера по цветовому контрасту и амплитудно-цветовой дискриминации.

Площадь проекции маркера на плоскость изображения имеет конечные размеры, которые изменяются в зависимости от ракурса наблюдения. Поэтому предложено после применения одного из решающих правил фильтровать бинаризованный образ сцены с помощью медианного фильтра.

$$m_{j \min} \leq m_j \leq m_{j \max}; \quad j_{m \min} \leq j_m \leq j_{m \max}.$$

где m_j – дискретные координаты, лежащие в j -й строке, j_m – дискретные координаты, лежащие в m -том столбце.

Координаты маркера рассчитываются по следующим зависимостям:

$$m^\circ = \frac{1}{\max(j_{m \max}) - \min(j_{m \min}) + 1} \sum_{j=\min(j_{m \min})}^{\max(j_{m \max})} \frac{m_{j \min} + m_{j \max}}{2};$$

$$j^\circ = \frac{1}{\max(m_{j \max}) - \min(m_{j \min}) + 1} \sum_{m=\min(m_{j \min})}^{\max(m_{j \max})} \frac{j_{m \min} + j_{m \max}}{2};$$

Физическое местоположение центра образа маркера определяется как

$$\begin{cases} Y^\circ(m) = \beta + 2\beta \left(m^\circ - \frac{M}{2} \right); \\ Z^\circ(j) = \beta + 2\beta \left(j^\circ - \frac{J}{2} \right). \end{cases}$$

Показано, каким образом из физических координат центра образа маркера в системе, включающей два TV-модуля, могут быть найдены четыре плоскости (две горизонтальные, и две вертикальные), определяющие направление на физический центр маркера. Из уравнений плоскостей могут быть выбраны следующие четыре триады уравнений, для расчета координат центра:

$$\begin{cases} (x - x_l) \hat{v}_{\psi lx} + (y - y_l) \hat{v}_{\psi ly} + (z - z_l) \hat{v}_{\psi lz} = 0; \\ (x - x_l) \hat{v}_{\vartheta lx} + (y - y_l) \hat{v}_{\vartheta ly} + (z - z_l) \hat{v}_{\vartheta lz} = 0; \\ (x - x_n) \hat{v}_{\psi nx} + (y - y_n) \hat{v}_{\psi ny} + (z - z_n) \hat{v}_{\psi nz} = 0 \end{cases} \rightarrow \left({}^1x_{K^\circ ln}, {}^1y_{K^\circ ln}, {}^1z_{K^\circ ln} \right)$$

$$\begin{cases} (x - x_l) \hat{v}_{\psi lx} + (y - y_l) \hat{v}_{\psi ly} + (z - z_l) \hat{v}_{\psi lz} = 0; \\ (x - x_l) \hat{v}_{\vartheta lx} + (y - y_l) \hat{v}_{\vartheta ly} + (z - z_l) \hat{v}_{\vartheta lz} = 0; \\ (x - x_n) \hat{v}_{\vartheta nx} + (y - y_n) \hat{v}_{\vartheta ny} + (z - z_n) \hat{v}_{\vartheta nz} = 0 \end{cases} \rightarrow \left({}^2x_{K^\circ ln}, {}^2y_{K^\circ ln}, {}^2z_{K^\circ ln} \right)$$

$$\begin{cases} (x - x_l) \hat{v}_{\psi lx} + (y - y_l) \hat{v}_{\psi ly} + (z - z_l) \hat{v}_{\psi lz} = 0; \\ (x - x_n) \hat{v}_{\psi nx} + (y - y_n) \hat{v}_{\psi ny} + (z - z_n) \hat{v}_{\psi nz} = 0 \\ (x - x_n) \hat{v}_{\vartheta nx} + (y - y_n) \hat{v}_{\vartheta ny} + (z - z_n) \hat{v}_{\vartheta nz} = 0 \end{cases} \rightarrow \left({}^3x_{K^\circ ln}, {}^3y_{K^\circ ln}, {}^3z_{K^\circ ln} \right)$$

$$\begin{cases} (x - x_l) \hat{v}_{\vartheta lx} + (y - y_l) \hat{v}_{\vartheta ly} + (z - z_l) \hat{v}_{\vartheta lz} = 0 \\ (x - x_n) \hat{v}_{\psi nx} + (y - y_n) \hat{v}_{\psi ny} + (z - z_n) \hat{v}_{\psi nz} = 0 \\ (x - x_n) \hat{v}_{\vartheta nx} + (y - y_n) \hat{v}_{\vartheta ny} + (z - z_n) \hat{v}_{\vartheta nz} = 0 \end{cases} \rightarrow \left({}^4x_{K^\circ ln}, {}^4y_{K^\circ ln}, {}^4z_{K^\circ ln} \right), \quad (3)$$

где $x_l, y_l, z_l, x_n, y_n, z_n$ – координаты l -го и n -го TV-модулей, соответственно; $\hat{v}_{\psi lx}, \hat{v}_{\psi ly}, \hat{v}_{\psi lz}, \hat{v}_{\vartheta lx}, \hat{v}_{\vartheta ly}, \hat{v}_{\vartheta lz}, \hat{v}_{\psi nx}, \hat{v}_{\psi ny}, \hat{v}_{\psi nz}, \hat{v}_{\vartheta nx}, \hat{v}_{\vartheta ny}, \hat{v}_{\vartheta nz}$ – направляющие

косинусы плоскостей, формируемых по углам азимута (ψ) и места (ϑ) направления на центр маркера, формируемых по информации, получаемой с l -го и n -го TV-модулей.

Вследствие инструментальных и методических погрешностей оценки координат центра маркера в общем случае имеет место невязка измерений:

$$\begin{aligned} \left({}^1x_{K^{\circ}ln}, {}^1y_{K^{\circ}ln}, {}^1z_{K^{\circ}ln} \right) &\neq \left({}^2x_{K^{\circ}ln}, {}^2y_{K^{\circ}ln}, {}^2z_{K^{\circ}ln} \right) \neq \left({}^3x_{K^{\circ}ln}, {}^3y_{K^{\circ}ln}, {}^3z_{K^{\circ}ln} \right) \neq \\ &\neq \left({}^4x_{K^{\circ}ln}, {}^4y_{K^{\circ}ln}, {}^4z_{K^{\circ}ln} \right). \end{aligned}$$

Для повышения точности оценки координат предложено провести усреднение результатов:

$$x_{K^{\circ}ln} = \frac{1}{4} \sum_{s=1}^4 {}^s x_{K^{\circ}ln}; \quad y_{K^{\circ}ln} = \frac{1}{4} \sum_{s=1}^4 {}^s y_{K^{\circ}ln}; \quad z_{K^{\circ}ln} = \frac{1}{4} \sum_{s=1}^4 {}^s z_{K^{\circ}ln}$$

и оценивать общую невязку как

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xln} &= \frac{1}{4} \sqrt{\sum_{s=1}^4 \left(x_{K^{\circ}ln} - {}^s x_{K^{\circ}ln} \right)^2}; \quad \varepsilon_{yln} = \frac{1}{4} \sqrt{\sum_{s=1}^4 \left(y_{K^{\circ}ln} - {}^s y_{K^{\circ}ln} \right)^2}; \\ \varepsilon_{zln} &= \frac{1}{4} \sqrt{\sum_{s=1}^4 \left(z_{K^{\circ}ln} - {}^s z_{K^{\circ}ln} \right)^2} \quad \varepsilon_{ln} = \sqrt{\varepsilon_{xln}^2 + \varepsilon_{yln}^2 + \varepsilon_{zln}^2}. \end{aligned}$$

Подчеркивается, что оценки координат и невязок получены для самого общего расположения TV-модулей. В том случае, если TV-модули установлены на одном уровне ($z_l \cong z_n$) и хорошо отгоризонтированы ($\gamma_l \cong 0, \gamma_n \cong 0$) вторая и четвертая системы из (3) приближаются к вырожденным, т.е. имеющим бесконечное множество решений. В этом случае осреднение результатов предложено производить по первой и третьей системам.

Разработана методика оценки координат центра маркера для случая произвольного количества маркеров, заключающаяся в выборе пар TV-модулей и осреднении результатов.

В четвертой главе решена задача разработки аппаратной части аппаратно-программного комплекса трассировки движения оператора.

В экспериментальной установке к ЭВМ со стандартной конфигурацией подключается контроллер вывода, формирующий сигнал управления, запускающий одновременно два TV-модуля. Модули записывают изображение на промежуточный носитель. Далее информация с носителя обрабатывается на ЭВМ.

Определены факторы, влияющие на инструментальную погрешность оценки координат маркера. К ним относятся точность позиционирования TV-модулей, перекося данных и «смаз» изображения.

Влияние неточности позиционирования предложено определять с применением аппарата функций чувствительности. Разработан метод определения функций чувствительности по системе дифференциальных уравнений без ее решения.

Показано, что если система линейных уравнения вида (3) может быть решена с помощью расчета определителей:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \dots & \alpha_{1\theta} & \dots & \alpha_{1\rho} \\ & & \dots & & \\ \alpha_{\rho 1} & \dots & \alpha_{\rho\theta} & \dots & \alpha_{\rho\rho} \\ & & \dots & & \\ \alpha_{p1} & \dots & \alpha_{p\theta} & \dots & \alpha_{p\rho} \end{vmatrix} \neq 0; \quad \Delta_{\theta} = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \dots & \beta_1 & \dots & \alpha_{1\rho} \\ & & \dots & & \\ \alpha_{\rho 1} & \dots & \beta_{\rho} & \dots & \alpha_{\rho\rho} \\ & & \dots & & \\ \alpha_{p1} & \dots & \beta_p & \dots & \alpha_{p\rho} \end{vmatrix} \neq 0,$$

где $\alpha_{...}$ – коэффициенты; $\beta_{...}$ – свободные члены, то коэффициенты чувствительности

определяются по зависимостям:

$$\frac{\partial \zeta_{\theta}}{\partial \alpha_{\rho\varsigma}} = \frac{\rho\varsigma \Delta_{\theta} (-1)^{\rho+\varsigma} \cdot \Delta - \Delta_{\theta} \cdot \rho\varsigma \Delta (-1)^{\rho+\varsigma}}{\Delta^2}; \quad \frac{\partial \zeta_{\theta}}{\partial \beta_{\rho}} = \frac{\rho\theta \Delta_{\theta} (-1)^{\rho+\theta}}{\Delta},$$

где ζ_{θ} – искомое решение исходного линейного уравнения; $\rho\theta \Delta$ – алгебраические дополнения, стоящие на пересечении ρ -й строки и θ -го столбца. С использованием полученных зависимостей определены функции влияния для случая (3).

Показано, что инструментальная ошибка, возникающая вследствие перекоса данных, зависит от текущей скорости движения маркера. Если появление управляющего сигнала на периоде $0 - T_{\text{CCD}}$ распределено равномерно и скорость движения маркера на этом периоде меняется мало, то ошибка может быть оценена как

$$\left(x_K - {}^0x_K, y_K - {}^0y_K, z_K - {}^0z_K \right) = \left(\frac{T_{\text{CCD}} \dot{x}_K}{2}, \frac{T_{\text{CCD}} \dot{y}_K}{2}, \frac{T_{\text{CCD}} \dot{z}_K}{2} \right), \quad (4)$$

где T_{CCD} – максимальное время перекоса.

Величина «смаза» также зависит от скорости движения маркера и времени накопления заряда. Показано, что зависимости, определяющие величину «смаза», подобны зависимостям (4).

Показано, что сравнение траекторий движения идеального и обучаемого операторов по прямому методу (см. (2)), затруднительно, по следующим причинам:

требуется знать и воспроизводить абсолютно одинаковые условия эксперимента с идеальным и обучаемым оператором (частота съемки, количество кадров, начальная и конечная точки траектории, и т.п.);

возможно возникновение ситуации, что у обучаемого оператора движения органов происходит по траектории, близкой к траектории идеального оператора, но в другом темпе, что связано с различиями в психофизиологии обучаемого и идеального операторов и др.

Разработан параметрический метод сравнения минимальных движений эталонного и обучаемого операторов, основанный на покоординатной аппроксимации траектории квадратичными парабололами $(x_K, y_K, z_K) = a_{x,y,z} t^2 + b_{x,y,z} t + c_{x,y,z}$ с учетом масштабирования по времени, и сравнении параметров, определяющих вид парабол. Аппроксимацию предложено проводить регрессионным методом. Аппроксимация дает 9-мерный вектор коэффициентов $(a_x, b_x, c_x, a_y, b_y, c_y, a_z, b_z, c_z)$, характеризующий движение обучаемого оператора. При обучении указанный вектор должен сравниваться с вектором, описывающим аналогичное движение эталонного оператора.

Проведен анализ случая, когда у обучаемого оператора движения органов происходит по траектории, близкой к траектории идеального оператора, но в другом темпе. Для оценки точности движения вводится масштабирование по времени с коэффициентом $\kappa_{\tau} = \frac{\tau_1}{\tau_2}$. Показано, что масштабирование по времени сводится к изменению коэффициентов $(a_x, b_x, c_x, a_y, b_y, c_y, a_z, b_z, c_z)$. Пересчет производится по зависимостям: $\hat{a}_{x,y,z} = a_{x,y,z} \kappa_{\tau}^2$, $\hat{b}_{x,y,z} = b_{x,y,z} \kappa_{\tau}$, $\hat{c}_{x,y,z} = c_{x,y,z}$. Коэффициент масштабирования определяется по общей длительности эксперимента.

Сравнение движений эталонного и обучаемого операторов осуществляется по следующему принципу:

$$\begin{cases} |\hat{a}_x - \bar{a}_x|, |\hat{a}_y - \bar{a}_y|, |\hat{a}_z - \bar{a}_z| \leq \varepsilon_a; \\ |\hat{b}_x - \bar{b}_x|, |\hat{b}_y - \bar{b}_y|, |\hat{b}_z - \bar{b}_z| \leq \varepsilon_b; \\ |\hat{c}_x - \bar{c}_x|, |\hat{c}_y - \bar{c}_y|, |\hat{c}_z - \bar{c}_z| \leq \varepsilon_c, \end{cases} \quad (5)$$

где $\bar{a}_x, \bar{a}_y, \bar{a}_z, \bar{b}_x, \bar{b}_y, \bar{b}_z, \bar{c}_x, \bar{c}_y, \bar{c}_z$ – параметры движения эталонного оператора; $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$ – допустимые несовпадения траекторий.

Теоретические результаты подтверждены экспериментально на двухмодульной системе трассировки движения обучаемого оператора.

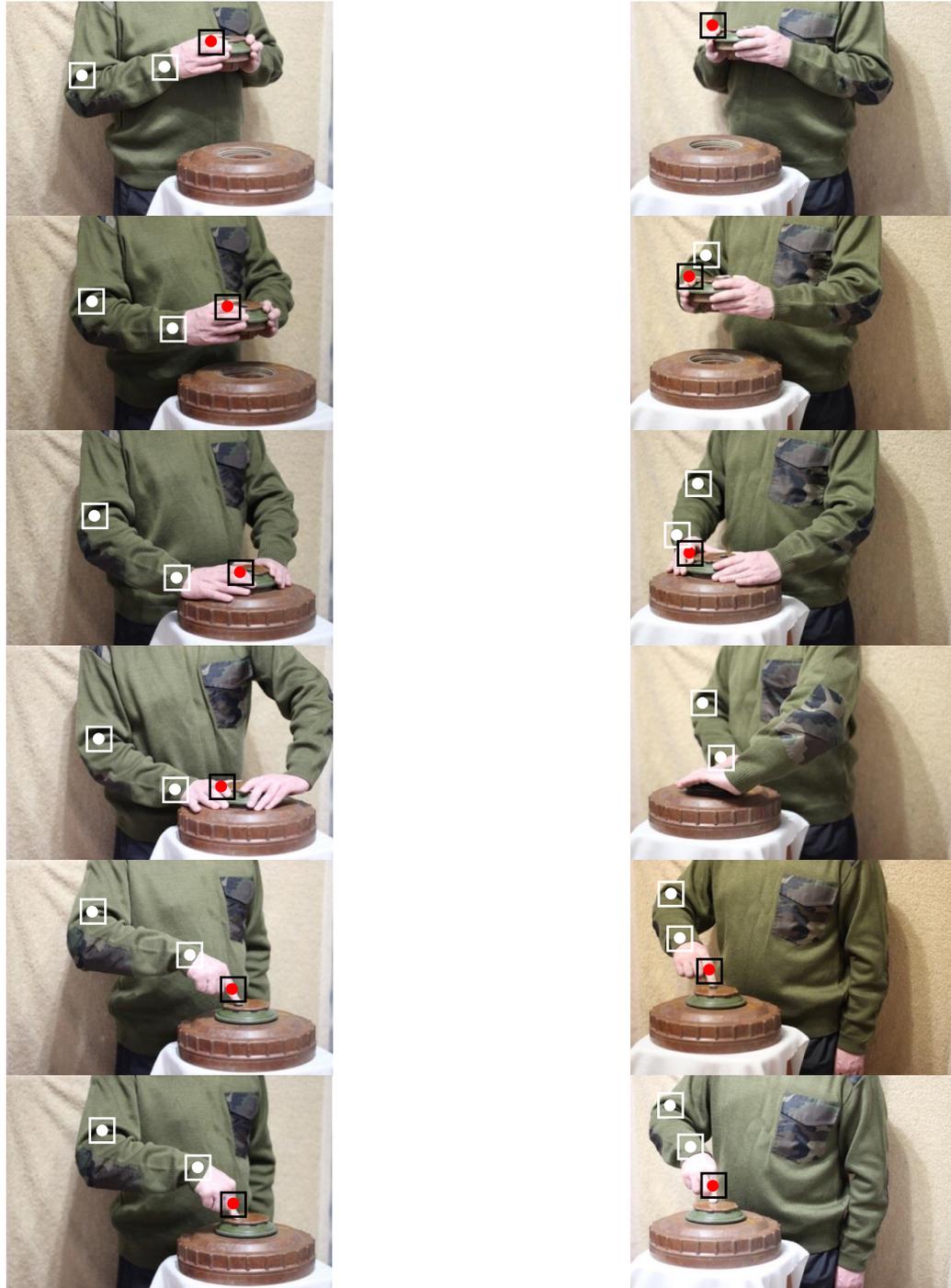


Рис. 4. Последовательность изображений руки оператора

Выборочные кадры из видеопотока: начальные, средние и конечные кадров с левого (сверху) и правого (снизу) TV-модулей приведена на рис. 4.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации решена научно-техническая задача, заключающаяся в разработке методов дистанционного оценивания пространственного положения частей тела обучаемого оператора при трассировке его движений в тренажерах и сравнения их с действиями эталонного оператора. В целом по работе можно сделать *выводы*.

1. На основании анализа сенсоров различного типа сделан вывод о перспективности использования для дистанционной оценки пространственного положения органов обучаемого оператора фотоэлектронных преобразователей CCD типа в паре с маркерами, размещаемыми на движущихся органах.

2. Показано, что с технической точки зрения обработка моторной реакции обучаемого оператора сводится к достижению оптимальных значений параметров кривых, описывающих движение, по критерию близости к кривым движения идеального оператора.

3. Разработаны математические модели фотоэлектронного преобразования светового потока, несущего информацию о наблюдаемой сцене, при сканировании цветных изображений, показано, что разделение на цветовые составляющие осуществляется за счет введения в структуру CCD оптических фильтров, определена индексация, соответствующая расположению фильтров на структуре CCD.

4. Разработана цифровая модель сцены, в которой дискретизация осуществляется реальным дискретизатором по времени и цветовым составляющим; в реальном дискретизаторе учтено конечное время накопления заряда в CCD-приборе и конечные размеры фоточувствительных элементов, а также структура расположения светофильтров на фоточувствительных элементах, получены оценки точности цифровой модели сцены.

5. Предложен метод амплитудно-цветовой дискриминации и получено решающее правило для выделения пикселей, относящихся к образу маркера, из общего массива пикселей, представляющих сцену.

6. Для снижения неопределенности предложено проводить дополнительный отбор пикселей, относящихся к образу маркера, по критерию связности с применением дополнительной медианной фильтрации бинаризованного изображения.

7. Получены зависимости для оценки координат центра образа маркера как геометрического центра области ЦМИ, относящейся к образу маркера и пространственного положения маркера в Земной системе координат при съемке сцены множеством TV-модулей.

8. Предложен вариант реализации комплекс трассировки движения оператора с синхронным запуском от ЭВМ, накоплением видеоданных на промежуточный носитель и переносом видеоданных в ЭВМ для обработки на промежуточном носителе, показано, что подобный вариант позволяет повысить точность трассировки за счет уменьшения перекоса данных.

9. Предложено представлять трассу в виде системы трех функций от времени, каждая из которых представляет одну координату трассы, получены требования, которым должна удовлетворять каждая из трех функций, для того, чтобы дискретизация трассы по времени выполнялась без потерь, а также зависимости для определения потерь при дискретизации.

10. Определено влияние инструментальных погрешностей TV-модулей на точность определения координат маркера, получены зависимости для суммарной инструментальной погрешности и показано, что зависимости представляют собой многопараметрические функции со сложной системой вложения..

11. Разработан метод расчета функций чувствительности, если параметры являются коэффициентами, или свободными членами линейной системы уравнения, не требующий разрешения системы относительно переменных.

12. Произведена оценка перекоса данных при видеосъемке и «смаза» изображения на точность определения координат маркера.

13. Разработан параметрический метод сравнения движений эталонного и обучаемого операторов, основанный на покоординатной аппроксимации траектории движения квадратичными параболлами с учетом масштабирования по времени, и сравнении параметров, определяющих вид парабол, эталонного и обучаемого операторов.

14. Теоретические результаты подтверждены экспериментально на двухмодульной системе трассировки движения обучаемого оператора.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Дальнейшее развитие работ связано с более детальным исследованием методов снижения инструментальной и методической погрешности при трассировке движения, разработкой быстродействующего интерфейса передачи видеопотока и обработки видеoinформации в режиме on-line, разработкой конструкции излучателей с более широкой диаграммой направленности, исследованием возможности аппроксимации трассы движения сплайнами.

Публикации в изданиях ВАК РФ

1. Андросов А.Ю. Контроль канала измерения модулирующего фактора в системах технического зрения / А.Ю. Андросов, А.А. Горшков, В.В. Котов // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – Выпуск 9: в 2 ч. Ч. 1. – С. 18 – 26.

2. Андросов А.Ю. Методы исследования оптико-электронных систем / А.Ю. Андросов, Т.Р. Кузнецова, Ю.И. Луцков, А.П. Чупахин // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – Выпуск 9: в 2 ч. Ч. 1. – С. 33 – 40.

3. Андросов А.Ю. Наблюдение точечных источников под разными ракурсами / А.А. Аршакян, А.Ю. Андросов, А.А. Горшков // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – Выпуск 9: в 2 ч. Ч. 1. – С. 50 – 57.

4. Андросов А.Ю. Определение координат точки в системе наблюдения на базе TV-модулей / А.А. Горшков, А.Ю. Андросов, В.В. Семигорелов, А.А. Аршакян // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – Выпуск 11: в 2 ч. Ч. 1. – С. 412 – 417.

5. Андросов А.Ю. Размещение системы технического зрения на манипуляторе мобильного робота / А.Ю. Андросов, А.А. Горшков, Ю.И. Луцков // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – Выпуск 11: в 2 ч. Ч. 1. – С. 418 – 426.

6. Андросов А.Ю. Базовые функции, используемые для моделирования точечных источников / А.А. Аршакян, А.Ю. Андросов // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2015. – Выпуск 7: в 2 ч. Ч. 1. – С. 244 – 249.

7. Андросов А.Ю. Селекция и определение местоположения точечного источника / А.А. Акименко, А.Ю. Андросов, А.А. Аршакян // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2015. – Выпуск 9. – С. 3 – 11.

8. Андросов А.Ю. Цветовая селекция точечных источников / А.Ю. Андросов // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2016. – Выпуск 2. – С. 28 – 33.

9. Андросов А.Ю. Оценка параметров траекторий движения точечного объекта на плоскости / А.Ю. Андросов, А.А. Аршакян // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2016. – Выпуск 2. – С. 34 – 39.

10. Андросов А.Ю. Выделение образа маркера из изображения / А.Ю. Андросов, А.А. Аршакян, Т.Р. Кузнецова // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2016. – Выпуск 9. – С. 51 – 59.

11. Андросов А.Ю. Модель оценки фотометрических параметров сцены / Т.А. Акименко, А.Ю. Андросов, А.А. Горшков // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2016. – Выпуск 12: в 4 ч. Ч. 4. – С. 213 – 219.

12. Андросов А.Ю. Информационно-измерительные системы трассировки движения / А.Ю. Андросов, Д.В. Богданов, Т.Р. Кузнецова // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2016. – Выпуск 12: в 4 ч. Ч. 4. – С. 220 – 228.

13. Андросов А.Ю. Модель цветовой дискретизации сигналов / А.Ю. Андросов, Т.Р. Кузнецова, Е.В. Ларкин // Информационные системы и технологии. – Орёл : Изд-во ОГУ, 2017. – Выпуск 6. (104) – С. 12 – 18.

14. Андросов А.Ю. Идентификация маркера в системе трассировки движения / А.Ю. Андросов // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2018. – Выпуск 2. – С. 26 – 32.

Публикации в прочих изданиях

15. Андросов А.Ю. Этапы преобразования оптического сигнала в системах технического зрения / А.Ю. Андросов, А.А. Горшков, Ю.И. Луцков // Приборы и управление. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – Выпуск 12. – С. 15 – 18.

16. Андросов А.Ю. Изменение формы плоских предметов при их наблюдении под разными ракурсами / А.Ю. Андросов, А.А. Горшков // Управление параллельными и распределенными информационными процессами : материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – С. 48 – 53.

17. Андросов А.Ю. Распределенная система видеоконтроля с оптимальными параметрами / А.Ю. Андросов, А.А. Горшков, Ю.И. Луцков // Управление параллельными и распределенными информационными процессами : материалы Всероссийской научно-технической конференции. Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – С. 76 – 81.

18. Андросов А.Ю. Методы контроля систем технического зрения / А.Ю. Андросов // XXXII Научная сессия, посвященная Дню радио. – Тула : Изд-во НТО РЭС им. А.С. Попова, 2014. – С. 167 – 170.

19. Андросов А.Ю. Узлы механического перемещения / А.Ю. Андросов, А.А. Горшков, О.А. Игнатова // XXXII Научная сессия, посвященная Дню радио. – Тула : Изд-во НТО РЭС им. А.С. Попова, 2014. – С. 276 – 284.

20. Андросов А.Ю. Определение координат точки в системе, связанной с TV-модулем / А.Ю. Андросов, А.А. Горшков, В.В. Семигорелов, А.И. Кальной // XXXII Научная сессия, посвященная Дню радио. – Тула : Изд-во НТО РЭС им. А.С. Попова, 2014. – С. 289 - 293.

21. Андросов А.Ю. Контроль равномерности подсветки сцены / А.Ю. Андросов, А.А. Горшков, В.В. Котов // Проблемы наземной радиолокации : материалы X Всероссийской научно-технической Интернет-конференции. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – С. 25 – 27.

22. Андросов А.Ю. Оптико-электронные системы идентификации объектов / А.Ю. Андросов, Т.Р. Кузнецова, Ю.И. Луцков, А.П. Чупахин // Проблемы наземной радиолокации : материалы X Всероссийской научно-технической Интернет-конференции. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – С. 27 – 29.

23. Андросов А.Ю. Частотный метод идентификации объектов / А.Ю. Андросов // Приборы и управление. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2015. – С. 17 – 23.