

АДАПТИВНЫЕ СТЕРЕОТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

С.В. Петухов



**ПЕТУХОВ
Сергей
Васильевич**

Кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования заводов стройматериалов, изделий и конструкций Московского института коммунального хозяйства и строительства. Специалист в области робототехники, систем технического зрения и навигации роботов. Автор более 50 работ, в том числе 2 изобретений и 10 докладов на международных конференциях по проблемам робототехники. Основная научная деятельность связана с роботизацией производства строительных материалов и изделий.

Введение

Степень выполнения требований по надежности и точности получения информации зависит от используемой системы технического зрения (СТЗ), конфигурации стереотелевизионной системы технического зрения (стерео-СТЗ), формализации математической модели камер и программного обеспечения. Конфигурация стерео-СТЗ определяется числом камер, коли-

чеством и ориентацией стереобазисов, а также степенью участия оператора в измерениях.

Монокулярная СТЗ хорошо приспособлена к организованной среде, будь то движение робота внутри помещения или вне помещения по ровной местности [1, 2]. В этих случаях с помощью монокулярной СТЗ можно измерить дальность и определить расположение ориентиров в трехмерном пространстве. Несколько независимых друг от друга камер, направленных вперед, назад, вбок и т. д., позволяют осуществлять навигацию с помощью системы все-направленного зрения.

Сtereo-СТЗ с горизонтальной ориентацией базиса лучше приспособлена к окружению с преобладанием вертикальных (столбчатых) ориентиров [3, 4], а стерео-СТЗ с вертикальным базисом – для среды, в которой имеются горизонтальные элементы, например, пересеченная местность с горизонтальными и наклонными складками поверхности рельефа [5]. Часто используют комплексную СТЗ, состоящую из монокулярной СТЗ и стерео-СТЗ [2], при этом первая применяется для обнаружения препятствий на дороге, а вторая – для его идентификации [6].

Основной недостаток стерео-СТЗ с одним базисом, например, при его горизонтальной ориентации (рис. 1, а) или с вертикальной ориентацией (рис. 1, б) состоит в ограничении углов наклона контуров, на которых могут измеряться точки. В стерео-СТЗ с горизонтальным базисом надежно измеряются лишь точки на

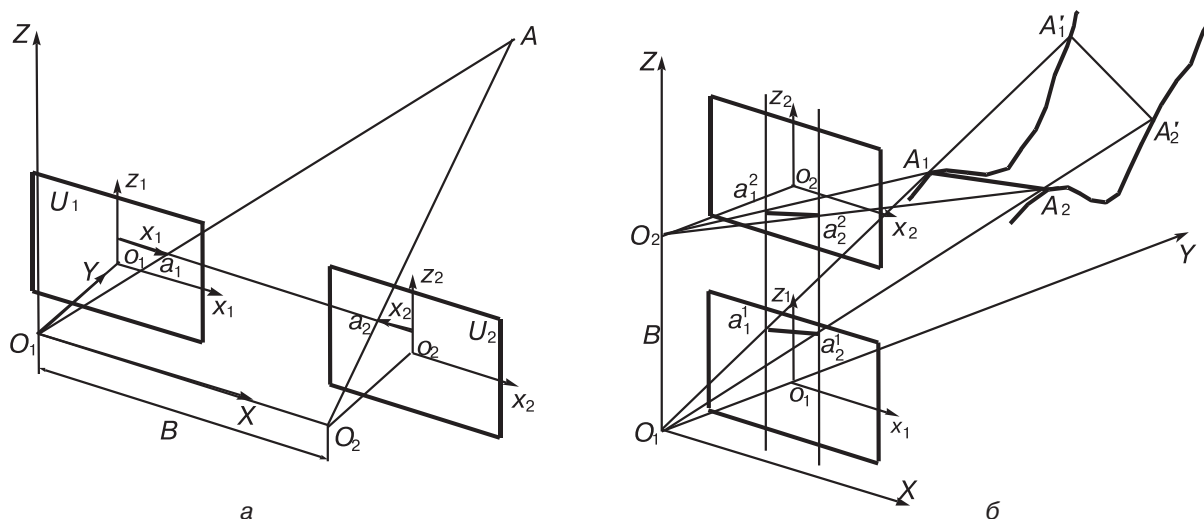


Рис. 1. Геометрия согласования контурных точек и контуров в стерео-СТЗ с горизонтальным базисом (а) и геометрия согласования контурных точек и контуров в стерео-СТЗ с вертикальным базисом (б)

вертикальных краях и совершенно не определяются на горизонтальных контурах, например, на складках пересеченной местности. Другая особенность стереозрения заключается в образовании невидимых областей (на рис. 1, б – под плоскостью $A_1A_2A'_1A'_2$) из-за эффекта загромождения при наблюдении объектов каждой камерой с разных точек O_1 и O_2 , разнесенных на базисной линии.

Тринокулярная стерео-СТЗ, в которой три камеры разнесены в плоскости изображения по трем не пересекающимся стереобазисам, позволяет получить информацию о градиентах интенсивности как минимум по двум стереобазисам. Предполагается, что оптические оси всех трех камер имеют одинаковое направление, а все три изображения лежат в одной (картинной) плоскости, образуя триплет. Геометрия тринокулярной стерео-СТЗ определяется взаимным расположением трех изображений в картинной плоскости [7]. Схема расположения изображений на рис. 2 отличается простотой вычисления параллакса по двум (из трех) базисов, так как базисные линии коллинеарны строкам и столбцам изображений.

Полинокулярная (многостереопарная) стерео-СТЗ включает блок из трех или более телекамер, установленных на одном стереобазисе таким образом, что их главные оптические оси взаимно параллельны [8]. Частный случай

многостереопарной стерео-СТЗ – стереозрение в движении, получается путем перемещения только одной (единственной) телекамеры при неизменной ориентации стереобазиса.

Разновидность стерео в движении с нулевым стереобазисом реализуется при повороте телекамеры для измерения угла поворота путем анализа пары изображений или последовательности изображений [9].

В статье приводятся результаты экспериментов и исследований новых способов обработки и анализа стереоизображений, позволяющих сократить время на вычисления, увеличить надежность и точность измерений.

1. Классификация и основные параметры стерео-СТЗ

Геометрия съемки в стерео-СТЗ с горизонтальным базисом приведена на рис. 1, а.

Две камеры представляются их эквивалентной моделью с точечными объективами, где U_1 и U_2 – плоскости изображений; O_1 и O_2 – центры проекций соответственно левого и правого изображений; $a_1(x_1, z_1)$ и $a_2(x_2, z_2)$ проекции пространственной точки $A(X, Y, Z)$. Проектирующие лучи AO_1 и AO_2 определяют эпиполярную плоскость, проходящую через центры проекций и точку A . Точка a_1 на левом изображении и соответствующая ей точка a_2 на правом изображении должны лежать на эпиполярной линии –

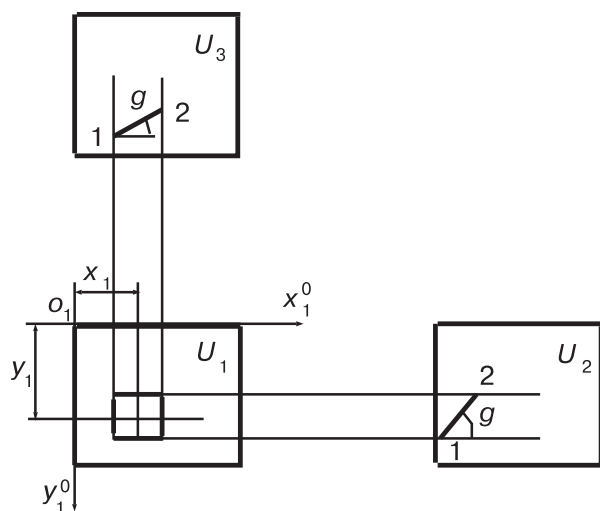


Рис. 2. Геометрия согласования контурных признаков в зависимости от ориентации контура γ в тринокулярной стерео-СТЗ

пересечении эпиполярной плоскости и плоскости изображения. Эпиполярная линия на правом изображении определяет область поиска соответственной (парной) точки a_2 . Эпиполярные ограничения существенно сокращают затраты времени на решение задачи согласования изображений.

При условии, что оптические оси камер параллельны, пространственные координаты измеряемой точки в камерной системе координат определяются с помощью следующих соотношений:

$$\begin{aligned} Y &= Bf_p/p; \\ X &= Bx_1/p; \\ Z &= Bz_1/p, \\ f_p &= O_1o_1 = O_2o_2, \end{aligned}$$

где B – база стереосистемы; $p = (x_1 - x_2)$ – параллакс; f_p – приведенное фокусное расстояние камер, воображаемое отстояние цифрового изображения от центра проекций O_1 или O_2 .

Значение величины f_p определяется экспериментально на этапе калибровки камер и стереоблока, для чего на изображениях стереопары измеряются координаты x_{1i} и x_{2i} i -й точки и вычисляется параллакс $p_i = x_{1i} - x_{2i}$. Величина f_p определяется по формуле:

$$f_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Y_{Mi} p_i}{B},$$

где p_i – параллакс i -й метки M_i , измеренный

в пикселях; Y_{Mi} – ее координата дальности; n – количество меток ($n = 3-5$).

Разработана методика определения величины f_p с использованием меток M_i , располагаемых на заданном удалении от камеры. Юстировка стереоблока осуществляется с помощью специальных программ для компенсации углового рассогласования изображений и линейных смещений Δ_x и Δ_z по координатам x и z . Параметры f_p , B , поправки Δ_x и Δ_z на боковое и поперечное относительные смещения изображений образуют модель стерео-СТЗ.

Тринокулярная стерео-СТЗ на основе трех синхронизированных твердотельных камер дает стереоизображения, которые образуют триплет – систему из трех изображений U_1 , U_2 и U_3 (см. рис. 2).

Наличие горизонтального и вертикального базисов позволяет отождествлять на изображениях отрезки контуров практически любой ориентации, в том числе строго вертикальные и горизонтальные. Тем самым повышается плотность расположения измеренных точек на цифровой карте высот, построенной по данным от тринокулярной стерео-СТЗ. В многостереопарной стерео-СТЗ (на основе более чем двух камер на одном стереобазисе) исключается проблема согласования признаков, а дальность определяется наклоном контурного отрезка на специальном изображении, синтезированном из эпиполярных линий (строк), выстраиваемых одна под другой. Специальный вид стерео-СТЗ с нулевым стереобазисом на основе одной поворотной камеры используется для определения угла поворота по последовательности получаемых изображений.

2. Реализация машинного стереозрения

Стерео-СТЗ реализует принципы и алгоритмы машинного зрения. Ее работа включает следующие основные вычислительные процедуры: предобработку (улучшение качества изображений) и выделение признаков для согласования изображений; определение параметров контура; установление соответствия (согласование изображений), восстановление

глубины и трехмерных координат точек сцены. Реализация каждой из этих составляющих имеет свои особенности, влияющие на скорость вычислений, качество представления внешней среды и точность определения координат.

Предобработка изображений является важной составляющей стереозрения, предусматривающей улучшение качества изображений и выделение на них признаков с помощью дифференциального оператора, важнейшими из которых являются контурные, так как в контурах содержится основная информация об объекте. Профили интенсивности соответственных строк не являются подобными из-за различного положения телекамер в пространстве и эффектов загромождения (см. рис. 1, б), приводящих к существенной деформации профиля функции интенсивности. Шумы в электронных трактах порождают высокочастотные составляющие в амплитуде сигнала.

На контурах происходит резкое изменение функции интенсивности $f(i,j)$, поэтому для обнаружения контуров необходимо оценить градиент "идеальной" функции интенсивности изображения $\Phi(i,j)$, практически свободной от шума. Эта задача усложняется тем, что на самом деле наблюдается смесь $\Phi(i,j)$ со случайной помехой:

$$f(i,j) = f(\Phi(i,j), v(i,j)),$$

где $v(i,j)$ – шум наблюдения возможно с известными статистическими характеристиками (например, белый шум).

Задача восстановления градиента (производной) функции интенсивности $f(i,j)$ относит-

ся к числу некорректных: малым возмущениям функции интенсивности могут соответствовать большие отклонения значений производной. Нормализация функции интенсивности осуществляется путем построчного выравнивания интенсивности и контраста: каждый пиксель на изображении заменяется средним значением интенсивности по ближайшей окрестности – макропикселю. В одномерном случае оператор оценки производной $g(x)$ дискретной функции интенсивности на строке изображения имеет вид:

$$g(x) = \hat{f}(x) - \hat{f}(x-l), \quad \hat{f}(x) = \frac{1}{l} \sum_{i=x}^{x+l-1} f(i). \quad (1)$$

Указанный оператор выделяет два интервала (окна) длиной l непосредственно перед точкой x и после нее, усредняет функцию $f(x)$ по каждому из этих окон и вычисляет разность средних величин. При использовании малого окна размером $l=3$ практически не происходит сглаживания: выше заданного порога обнаружения T оказываются лишь "пики" производной, которые соответствуют очень контрастным перепадам функции интенсивности. С увеличением размера окна до $l=5-12$ уменьшается высокочастотная составляющая, и поэтому можно уменьшить порог обнаружения T до уровня шумов (порядка 10 градаций серого) и тем самым увеличить количество найденных контуров.

Вычисление производной двумерной функции на полосе шириной m элементов сводится к одномерному случаю путем "слияния" m строк в одну (рис. 3, а). В результате суммирования значений пикселей по строкам получим:

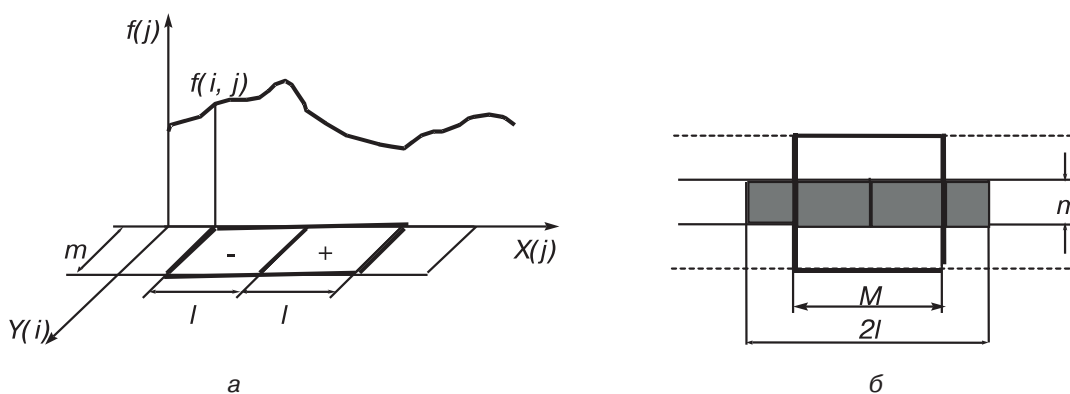


Рис. 3. Схема обнаружения контурных точек (а) и окно для оператора функциональной аппроксимации контура (б)

$$f_i(l) = \frac{1}{m} \sum_{p=i}^{l+m-1} f(p, j). \quad (2)$$

Значение производной $g(i, j)$ функции $f_i(j)$ вычисляется по аналогии с выражением (1) с учетом размера окна ($l \times m$) и формулы (2):

$$g(i, j) = f_i(j) \times \phi(j) = \frac{1}{l} \sum_{\phi=j}^{j+l-1} f_i(q) - \frac{1}{l} \sum_{\phi=j+1}^{j+2l-1} f_i(q),$$

$$g(i, j) = \frac{1}{W_m} \sum_{p=1}^{l+m-1} \left(\sum_{q=j}^{j+l-1} f(p, q) - \sum_{q=j+l}^{j+2l-1} f(p, q) \right), \quad (3)$$

где W_m – нормирующий коэффициент, равный площади окна.

Предположим, что случайное поле интенсивности на изображении описывается моделью с аддитивным гауссовым шумом в виде суммы:

$$f(i, j) = \Phi(i, j) + v(i, j), \quad (i, j) \in \overline{1, N},$$

$$M[v(i, j)] = 0, \quad M[v(i, j)v^T(i, j)] = \sigma^2 I, \quad (4)$$

где N – размер квадратного окна изображения; I – единичная матрица размером $(N \times N)$; M – математическое ожидание; σ^2 – дисперсия интенсивности; “ T ” – символ транспонирования. После подстановки выражения (4) в (3) получим:

$$g(i, j) = \frac{1}{W_m} \sum_{p=1}^{l+m-1} \left(\sum_{q=j}^{j+l-1} \Phi(p, q) - \sum_{q=j+l}^{j+2l-1} \Phi(p, q) \right) +$$

$$+ \frac{1}{W_m} \sum_{q=1}^{l+m-1} \sum_{q=1}^{j+2l-1} v(p, q). \quad (5)$$

При достаточно большой площади окна W_m (более 10 пикселей), объем выборки случайных помех становится таким, что слагаемое в уравнении (5) можно считать математическим ожиданием случайных помех, которое равно нулю с учетом допущения (4). В этом случае результат, получаемый с использованием (5), приближается к оценке производной идеальной функции $\Phi(i, j)$.

На рис. 3 показаны окна для обнаружения

контурных точек (рис. 3, а) и для оператора контура (рис. 3, б).

Критерий принятия решений о значимом перепаде функции интенсивности, соответствующем контуру на изображении, заключается в следующем:

$$|g(i, j)| \geq T, \quad \text{sign}[g'(i, j)] = -\text{sign}[g'(i, j+1)],$$

где $\text{sign}[g'(\cdot)]$ – знак второй производной функции интенсивности.

Определение контура на изображении производится лишь в тех местах, где выполняются эти два условия, при этом считается окно во всю ширину полосы для вычисления в нем параметров контура (рис. 3, б). При такой двухступенчатой процедуре время на обработку каждой полосы уменьшается в 8–10 раз.

Выделение контура в окне и определение его параметров производится с применением методов функциональной аппроксимации. Как показывает опыт разработки стерео-СТЗ, для успешной реализации алгоритмов машинного зрения на борту транспортного робота, наиболее подходящими являются два типа признаков, выделяемых на изображении – линейные сегменты (контуры) и контурные точки.

Параметры контуров определяются в окнах разной формы, приспособленных к формату изображения. Например, квадратные окна предназначены для изображений размерности 512x512, а прямоугольные – для размерности 512x256.

Контур аппроксимируется в квадратном окне ступенчатой функцией с использованием дифференцирующей маски. Формулы для определения угла наклона контура получены в работе [3]. Параметры выделенного контура в окне показаны на рис. 4, где a и b – средние

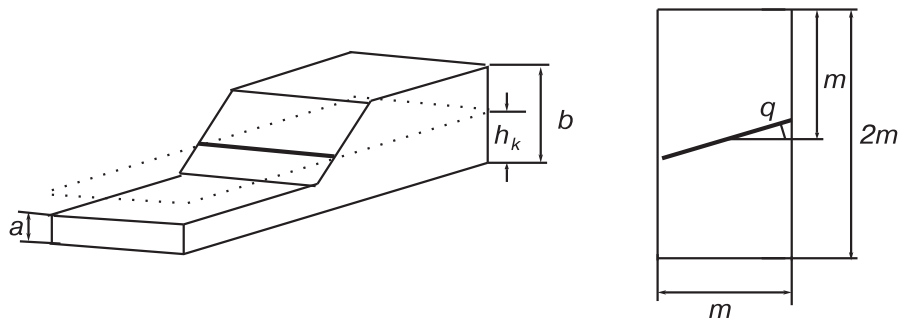


Рис. 4. Параметры (a, b, θ) оператора, получаемые в результате функциональной аппроксимации контура

значения интенсивности в прямоугольном окне по обе стороны от контура, $h_k = (a + b)/2$.

Контурная точка (КТ) описывается параметрами нормализованной интенсивности средними значениями a и b по обе стороны от линии контура в одномерном "окне" на строке изображения. Дополнительным параметром является знак перепада интенсивности $\Pi = (a-b)/|a-b|$. Контурные признаки (контур и контурные точки) отличаются сравнительно малой вычислительной сложностью, так как описываются двумя или тремя параметрами, определяемыми с использованием целочисленных операций. С другой стороны, ввиду малой размерности контурных признаков, для надежного согласования этих признаков в стерео-СТЗ требуются мощные алгоритмы, например, динамическое программирование, или подключение априорных данных (гипотез) о структуре внешней среды.

Согласование стереоизображений является центральной проблемой машинного стереозрения и формулируется следующим образом: должно быть установлено соответствие между однотипными признаками, которые являются проекциями одного и того же физического образования, наблюдаемого на каждом изображении.

Применительно к контурам условие близости, по которому производится согласование, можно записать в виде:

$$|e_i^1 - e_i^2| \leq W_i, \quad i=1,2,3, \quad (6)$$

где $\mathbf{W}=(W_1, W_2, W_3)^T$ – вектор допустимых отклонений (критерий близости) по компонентам

$e_1 = a, e_2 = b, e_3 = \theta$ в векторном пространстве параметров признака (рис. 5, а), где e_3 – угол наклона контура, $\mathbf{s}^j=(e_1^j, e_2^j, e_3^j)^T, j=1,2$. В качестве дополнительного параметра используется знак перепада интенсивности Π . Область поиска определяется допустимым параллаксом $[p_{\min}, p_{\max}]$, показанным на рис. 5, б.

Многообразие алгоритмов согласования основано на минимизации определенных функций невязки в векторном параметрическом пространстве, размерность которого изменяется от нескольких десятков (при согласовании областей) до двух или трех единиц для контура или контурной точки.

3. Развитие методов согласования стереоизображений

Для увеличения надежности согласования стереоизображений и, как следствие, повышения качества получаемой модели внешней среды, разработан целый ряд алгоритмов для стерео-СТЗ, работающих в полуавтоматическом и автоматическом режимах. Эти алгоритмы были испытаны на лабораторном комплексе стерео-СТЗ или реализованы в вычислительных программах для макетов бортовых стерео-СТЗ транспортных роботов.

Последовательный алгоритм согласования контурных точек, адаптированный к переменному контрасту на изображениях, избавляет от необходимости глобального статистического анализа контраста и определения на его основе минимального порога обнаружения конту-

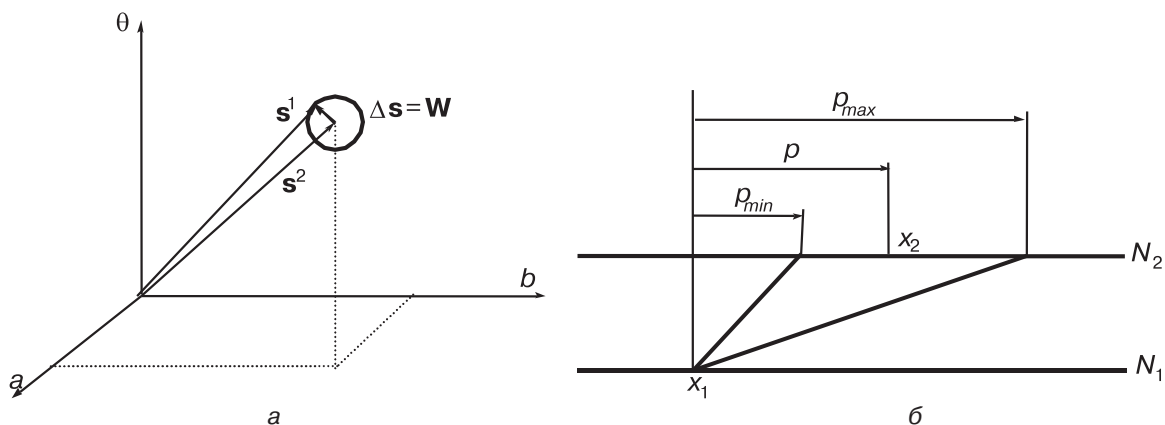


Рис. 5. Пространство признаков (а) и область поиска соответственного признака, определяемая допустимым параллаксом (б)

ров по всему изображению. Вместо этого задается порог обнаружения контура T_N , равный максимальному абсолютному значению контраста g_m , значительно превосходящим уровень шумов T на изображении. Задавая $T_N > T_{N-1} > \dots > T_k > \dots > T$, можно провести кластеризацию КТ. Поиск соответственных КТ целесообразно производить последовательно для каждого кластера с порогом T_k , используя найденные пары КТ на предыдущем шаге с порогом T_{k-1} в качестве границ областей.

Суть метода последовательного отождествления заключается в том, что на первом этапе на соответственных строках стереоизображений отождествляются пары КТ, принадлежащие наиболее контрастным контурам. Найденные КТ позволяют разбить строки на m подобластей $F_1, \dots, F_m$ (рис. 6), а на втором этапе отождествление ведется независимо в каждой подобласти среди менее контрастных контуров. Вновь найденные пары КТ служат для нового разбиения строк на более мелкие подобласти и т.д. Перед началом процедуры согласования формируются списки S^1 и S^2 контурных точек, определяемых локальными максимумами значений производных $g_1(x)$ и $g_2(x)$, найденных на эпиполярных строках стереопары изображений. Каждый элемент сформированных списков, помимо координаты КТ на изображении, описывается параметрами перепада интенсивности (a, b, Π) , где Π – знак перепада.

Для согласования изображений используется критерий, основанный на минимизации

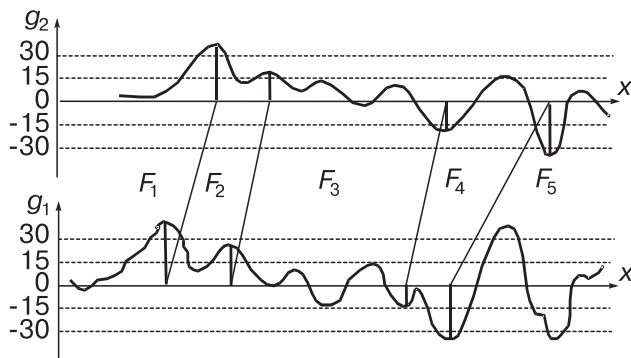


Рис. 6. Подобласти на двух соответственных строках, образовавшиеся после отождествления, проведенного при двух порогах обнаружения:
 $T = 30 (F_1, F_5); T = 15 (F_2, F_3, F_4)$

аддитивного показателя, составленного из взвешенных частных критериев R_l , где $l = 1, 2, 3, 4$; i – номер контура в списке S^1 ; j – номер контура в списке S^2 :

$$V_{ij} = c_1 R1_{ij} + c_2 R2_{ij} + c_3 R3_{ij} + c_4 R4_{ij};$$

$$R1_{ij} = |1 - g_i/g_j|; R2_{ij} = |1 - a_i/a_j|;$$

$$R3_{ij} = |1 - b_i/b_j|; R4_{ij} = |1 - d_i/d_j|;$$

$$d_i = a_i + b_i + g_i; d_j = a_j + b_j + g_j,$$

где $g = |a - b|$ – контраст; c_1, c_2, c_3, c_4 – весовые коэффициенты, учитывающие вклад каждого показателя в значение функционала.

Основное преимущество метода заключается в увеличении надежности отождествления слабоконтрастных контуров. Из-за неупорядоченности изменения значений параллакса p на строке (столбце) изображения обычные процедуры согласования, основанные на критерии (6), часто дают ложные отождествления.

При косоугольной съемке с наклонным базисом в вертикальной плоскости можно использовать гипотезу о подстилающей поверхности наблюдаемой сцены (плоскость OXZ на рис. 7, а). Имеется в виду, что на стереопаре с увеличением координаты изображения y параллакс $p(y)$ соответственных точек на опорной (подстилающей) поверхности должен возрастать (так как уменьшается дальность $Z(y)$ до соответствующей точки). В соответствии с этой гипотезой предполагается, что на плоскости изображения (x, y) , в общем случае $p(y)$ считается неубывающей функцией, т.е. $dp/dy \geq 0$ (рис. 7, б). Последнее условие означает, что параллакс монотонно возрастает от $p_{\min}$ – для точек на заднем плане, до $p_{\max}$ – для точек на переднем плане.

Указанное обстоятельство позволяет существенно ограничить область поиска соответственных точек на матрице согласования списков контурных точек S^1 и S^2 , найденных на строках стереопары изображений. При дальнейшем анализе не учитываются те пары точек, для которых параллакс выходит за допустимые пределы, т.е. при условии $p_{\min} \geq [y_1(j) - y_2(i)] > p_{\max}$. Кроме того отрицательный параллакс невозможен:

$$p_{ij} = [y_1(j) - y_2(i)] < 0.$$

Исключение из процедуры отождествления пар, удовлетворяющих названным условиям,

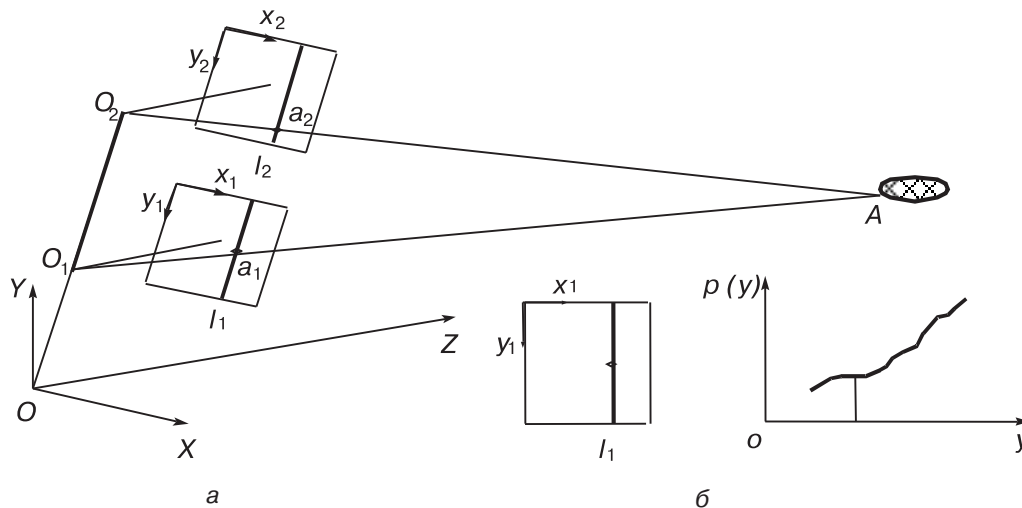


Рис. 7. Геометрия стереосъемки с базисом в вертикальной плоскости (а) и изменение параллакса на эпиполярной линии изображения (б)

позволяет в 2–3 раза уменьшить объем вычислений и в 5–10 раз сократить время для отождествления точек на стереопаре.

Для повышения надежности согласования изображений стереопары с горизонтальным базисом, полученной в неорганизованной среде, разработан метод группового согласования списков контуров S^1 и S^2 , найденных на соответственных полосах стереоизображений. Каждый элемент сформированных списков помимо его координат на изображении описывается параметрами, например, (a, b, θ) – для контуров и (a, b) – для контурных точек. Пусть список S^1 содержит I элементов, а список S^2 состоит из J элементов. Задача согласования заключается в анализе списков и поиске пар соответствующих друг другу контуров. Для решения подобных задач хорошо приспособлены методы, основанные на динамическом программировании. В основе алгоритма лежит поиск оптимального покрытия элементов одного списка контуров на другом списке в смысле минимума интегрального обобщенного критерия, полученного суммированием частных критериев несоответствия контуров:

$$f_{ij} = K_a(|a_i^1 - a_j^2| + |b_i^1 - b_j^2|) + K_\theta |\theta_i^1 - \theta_j^2|, \quad (7)$$

где $K_a = 1/A_a = 1/A_b$, $K_\theta = 1/A_\theta$ – нормирующие множители; A_a , A_b , A_θ – амплитуды параметров.

Заполняется матрица соответствия $\|F\|$ размерности $I \times J$, элементы которой F_{ij} харак-

теризуют оптимальное покрытие множества i первых элементов списка S^1 на j первых элементах списка S^2 . Для определения F_{ij} на каждом шаге решается функциональное уравнение Беллмана:

$$F_{ij} = \min_{1 \leq l \leq j} [\min(f_{il} + F_{i-1, l-1}), f_{i0} + F_{i-1, j}],$$

$$i = \overline{1, I}; \quad j = \overline{1, J}; \quad F_{0j} = 0; \quad F_{i0} = \sum_{l=1}^i f_{i0}, \quad (8)$$

где F_{ij} – минимальный суммарный критерий "несоответствия"; f_{i0} – приращение суммарного критерия при отбрасывании i -го контура из списка S^1 .

Позлементное соответствие между контурами получается путем обратного просмотра матрицы соответствия $\|F\|$, начиная с элемента F_{IJ} .

Вычислительная сложность такого алгоритма намного меньше известных аналогов, а его эффективность подтверждена в нескольких практических разработках. Координаты отождествленных контуров используются для определения координат точек рельефа и построения модели внешней среды.

Использование контурных точек в алгоритме согласования уменьшает количество вычислений, но предусматривает обязательную коррекцию стереоизображений путем выравнивания средних значений интенсивностей и контрастов. Пример уравненных контрастов на двух соответственных строках стереопары, полученной

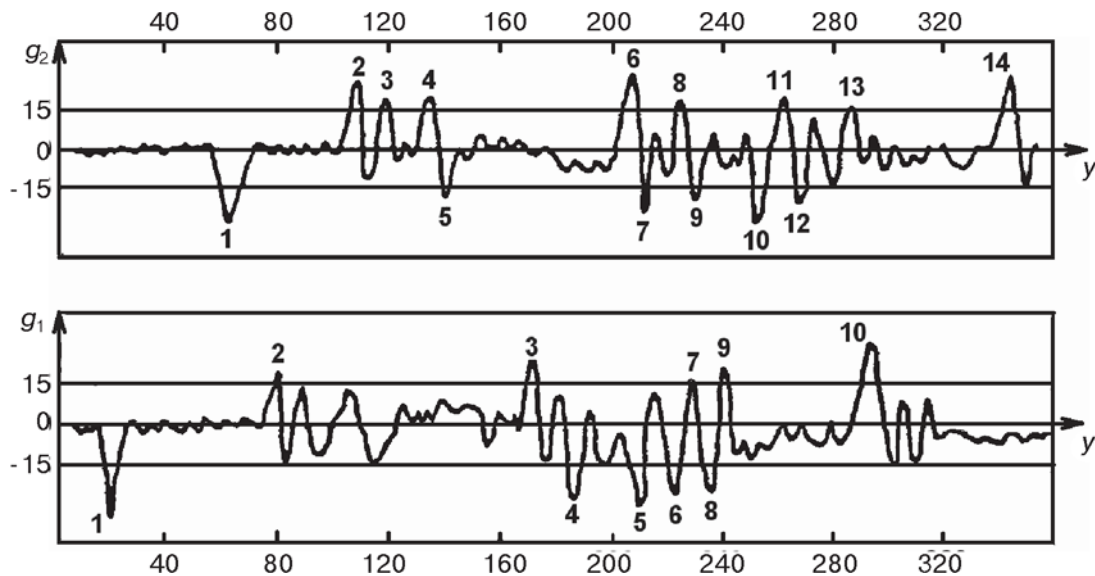


Рис. 8. Производные функции интенсивности с номерами контурных точек на соответственных строках стереопары для составления списков S^1 и S^2

с вертикальным базисом, приведен на рис. 8. Пронумерованы контурные точки, контраст которых больше заданного порога 15 единиц интенсивности на пиксель. В этом примере по спискам $S^1 (I=10)$ и $S^2 (I=14)$ найденных контурных точек составляется матрица поиска соответствия размерностью (10×14) . Выражение для частного критерия f_{ij} несоответствия признаков упрощается из-за того, что параметры a_i и b_j имеют одинаковую размерность и не требуется нормировка их разностей:

$$f_{ij} = |a_i^1 - a_j^2| + |b_i^1 - b_j^2|. \quad (9)$$

Определение величины f_{ij} по (9) в отличие от (7) производится с помощью целочисленных вычислений, что существенно сокращает вычислительные затраты. Разработана версия алгоритма, основанная на динамическом программировании для стереопарных изображений при вертикальном базисе с использованием внутренней модели мира (гипотезы подстилающей поверхности), которая повышает надежность согласования и позволяет дополнительно сократить время вычислений.

Алгоритм использовался в бортовой стерео-СТЗ автономного транспортного робота в системе автономной навигации для обнаружения препятствий на дороге и на пересеченной местности.

Многостереопарная стерео-СТЗ использует несколько камер (более трех), располагае-

мых на одном стереобазисе через равные интервалы. Способ многостереопарной съемки, разработанный И.В. Шамановым, позволяет свести задачу отождествления точек к выделению линии на изображении специального вида – параллаксграмме, которая получается путем сложения в "пакет" соответственных строк. Такой способ дает возможность надежно идентифицировать даже слабоконтрастные точки. Автором реализован растровый алгоритм выделения линий – контуров контрастных перепадов интенсивности в скользящем окне на параллаксграмме с использованием двух первых гармоник двумерного преобразования Фурье. Обнаружение наклонных линий контуров осуществляется с помощью ДОК путем сканирования узкой полосы параллаксграммы дифференцирующей маской с вычислением перепада интенсивности g , который считается значимым, если его величина превышает заданный порог T : $T \leq g$. Последующая доработка алгоритма на основе дифференциальных операторов выделения особых точек на строках параллаксграммы позволила уменьшить вычислительную сложность и уменьшить затраты времени на вычисления по изображениям ориентиров с вертикальными границами.

Человеко-машинный комплекс сочетает преимущества человека-оператора (возмож-

ность выбора точечных измерений и визуальный контроль их достоверности) и вычислительной машины (высокая скорость обработки большого объема информации и трехмерное представление измеряемых объектов). Исследованы два макета такой стерео-СТЗ для измерения координат: стерео-СТЗ транспортного робота на основе стереоблока из двух телевизионных камер при использовании стереопары с горизонтальным базисом и тринокулярная стерео-СТЗ, работающая по тринокулярным стереоизображениям с использованием модели внешней среды.

Алгоритм анализа стереоизображений с помощью перемещаемого курсора использует два вида представления информации: телевизионное моноизображение и цифровые стереоизображения специального вида. Для целеуказания оператор пользуется обычным моноизображением, которое в режиме трансляции подается на телевизионный монитор. На это изображение "накладывается" измерительная информация (номер и координаты измеренной точки, расстояние между измеренными точками) и служебная информация. Вычисление трехмерных координат производится по стереоизображениям.

Для указанной стерео-СТЗ разработан алгоритм согласования СТИ с использованием контурных точек. Такая система превосходит альтернативную стереоскопическую систему, в которой оператор не делает никаких измерений, а лишь наблюдает сцену, используя для этого жидкокристаллические очки.

Алгоритм согласования контурных признаков в этой стерео-СТЗ использует в качестве критерия близости $W = |e_1, e_2, e_3|$, определяемый в соответствии с (6), дополнительным признаком является знак перепада интенсивности P .

Экспериментальный человеко-машинный измерительный комплекс с бинокулярной стерео-СТЗ для телеуправляемого подвижного робота создан на основе двух телевизионных камер, образующих стереоблок с базовым расстоянием $B=87$ мм. Надежность определения пространственных координат точек наблюдае-

мой сцены достаточно высокая. Ошибки определения расстояния до измеряемых точек по дальности от 1,5 до 2,5 м составили не более 5% (для 90–95% измеренных точек), а по двум другим координатам еще меньше.

Трехбазисная (тринокулярная) человеко-машинная стерео-СТЗ подходит для навигации в неорганизованной среде и на пересеченной местности. Поисковый алгоритм согласования контурных точек предполагает измерение координат точки на изображении в два этапа.

На первом этапе оператор указывает курсором с помощью "мыши" выбранную точку наблюдаемой сцены на границе заметного контура. Поиск соответственных точек осуществляется по горизонтальному каналу, если $\gamma \geq 45^\circ$, или по вертикальному – в противном случае. Учитываются только те точки, для которых экстремум производной по абсолютной величине превышает заданный порог T . Величины экстремумов первой производной $g(x)$ обозначим через G_i , $i=1,2,\dots,k$, где k – общее число найденных на строке точек. Таким образом, условие существования контурной точки можно записать в виде $|G_i| \leq T$.

На втором этапе работы алгоритма производится уточнение положения выбранной точки по координате x_1^0 производной G^0 функции интенсивности на строке N_1 первого изображения в пределах малой окрестности указанной точки x_1 (15 пикселей).

Для указанной стерео-СТЗ разработаны алгоритмы согласования стереоизображений с использованием контурных точек. Человеко-машинный интерфейс позволяет строить геометрическую (призменную) модель внешней среды по измеренным точкам. Модель можно рассматривать с разных сторон на экране дисплея, в том числе в проекции на плановую плоскость, используя для этого средства программного пакета WINDOWS. В неорганизованной среде, где градиенты интенсивности не имеют преобладающей ориентации, тринокулярная стерео-СТЗ позволяет строить более детальный план рельефа.

Поисковый корреляционно-экстремальный (эвристический) алгоритм согласования приме-

нительно к изображениям трансформируется в согласование отрезка (окна) профиля функции интенсивности на одном изображении с профилем интенсивности на другом изображении при использовании значений каждого пикселя. В предлагаемом алгоритме не требуется вычислять производные от функции интенсивности, определять контурные точки и уточнять их положение. Эвристический алгоритм предполагает ввод ограничений на параллакс и использует упрощенную стационарную модель функции интенсивности. Этот алгоритм применялся для построения точечных планов-ориентиров.

Заключение

Предобработка изображений предусматривает улучшение их качества и выделение признаков на каждом изображении. Разработан алгоритм обнаружения контурных точек с помощью дифференциального оператора с последующим определением параметров контура в окне. При такой двухступенчатой процедуре время на обработку каждой полосы уменьшается в 8–10 раз.

Разработаны алгоритмы обработки и анализа стереопар с горизонтальной и вертикальной ориентацией стереобазиса в стерео-СТЗ. Применение на борту транспортного робота стереосистем с различной ориентацией стереобазиса позволяет получить приемлемую точность измерений в зависимости от преимущественной ориентации контуров на изображении. Развитием стереопарной измерительной системы является тринокулярная стерео-СТЗ, позволяющая отождествлять отрезки контуров любой ориентации по трем стереоизображениям и тем самым полнее реконструировать сложные трехмерные поверхности.

Разработанные алгоритмы согласования стереоизображений в автоматическом режиме позволяют повысить надежность измерений. Последовательный алгоритм согласования адаптирован к переменному контрасту на изображениях и повышает надежность отождествления слабых контрастных контуров. Использование модели подстилающей поверхности для стерео-СТЗ с вертикальным базисом сужает область поиска

соответственных точек. Алгоритм позволяет в 2–3 раза уменьшить объем вычислений и в 5–10 раз сократить время для отождествления точек на стереопаре. Согласование списков контурных точек с использованием метода динамического программирования позволяет использовать признаки с меньшей размерностью и повысить надежность стерео-СТЗ с горизонтальным базисом. Вычислительная сложность этого алгоритма оказалась на порядок меньше, чем известных аналогов. Способ многостереопарной съемки дает возможность надежно идентифицировать даже слабых контрастных точек.

Разработаны алгоритмы согласования стереоизображений в человеко-машинной измерительной стерео-СТЗ: использование курсора для указания измеряемых точек и возможность контроля согласования стереоизображений оператором обеспечивает высокую надежность измерений. Поисковый корреляционно-экстремальный (эвристический) алгоритм согласования не требует вычисления производных и благодаря целочисленным операциям обладает высоким быстродействием.

Список литературы

1. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976. – 511 с.
2. Bertozzi M., Broggi A., Conte G., Fascioli A. The Experience of the ARGO Autonomous Vehicle: Part of the SPIE Conf. on Enhanced and Synthetic Vision – Orlando, Florida. Apr., 1998. SPIE. Vol. 3364. P. 218–229.
3. Иванюгин В.М., Петухов С.В. Проблемы реализации машинного стереозрения // В сб. научн. тр. "Автономное управление и машинное зрение транспортных роботов". – М.: ИФТП, 1990. С. 75–85.
4. DeSouza G.N., Kak A.S. Vision for Mobile Robot Navigation: A Survey// IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. Vol. 24. N 2. P. 237–267.
5. Петухов С.В., Иванюгин В.М., Васильев В.Ф., Шаманов И.В. Автоматическое восстановление рельефа по результатам обработки стереотелевизионных изображе-

- ний // В сб. научн. тр. "Управление движением и техническое зрение автономных транспортных роботов". – М.: ИФТП, 1989. С.121–139.
6. Lange M.M., Ivaniugin V.M., Petuchov S.V. Computer Vision Technology for Improving Safety of Car Driving // The Open German Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding, 21-25 Sept. 1998, Herrshing. Collection of Abstract. Section D1. P. 10–15.
7. Петухов С.В., Иванюгин В.М., Кораблев К.В. Алгоритм анализа тринокулярных стерео-изображений с пересекающимися базиса-ми // В сб. науч. тр. "Информационные технологии искусственного интеллекта". – М.: ГосИФТП, 1994. С. 51–56.
8. Шаманов И.В. Методология построения систем машинного зрения подвижных аппаратов на основе использования последовательностей изображений: Дисс. ... доктора техн. наук. – М., 1995. – 172 с.
9. Drake K., McVey E., Inigo R. Sensor roll angle error for a mobile robot vising a navigation line // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1988. V. PAMI-10 (5). P. 727–731.

Уважаемые читатели!

Журнал «Машиностроение и инженерное образование» входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степени доктора или кандидата наук.