

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА

А. С. Кулик, А. Н. Радомский

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ"

Аннотация. Рассматривается применение системы технического зрения в навигационной задаче и определение ориентации шагающего робота относительно окружающей сцены. Показано, как подвижная камера позволяет получить стерео изображение. Рассмотрены следующие этапы преодоления препятствия - обнаружение, определение расстояния, скорости, размеров препятствия, углового положения робота. Рассматривается определение оптического потока. Приведена оценка техник оптического потока.

Ключевые слова: шагающий робот, обнаружение препятствия, оптический поток.

Введение

В течение последнего десятилетия производительность вычислительной техники увеличивалась в основном за счет уменьшения размеров транзисторов и увеличения их числа, а не за счет увеличения тактовой частоты, как это было несколько десятков лет назад. Это вызвано по-прежнему не полностью решенной проблемой отвода тепла. Поэтому для цифровых устройств увеличивается отношение мощность/размер, иными словами устройства одинаковой мощности становятся меньше.

Это приводит к тому что появляется возможность применения цифровых технологий там, где раньше это было не рентабельно. Значительный интерес представляет применение компактных вычислительных устройств обработки изображений для решения навигационной задачи.

Исследования в области обработки изображений для вычисления относительного движения камеры ведутся уже не один десяток лет. Цель состоит в том, чтобы вычислить приближение к плоскому движению - проекции трехмерного движения на плоскость камеры. Иными словами, вычисление относительного движения камеры происходит с помощью исследования пространственно-временных зависимостей изменения яркости видимых точек [1, 2]. Вычисление относительного движения и структуры поверхностей должно быть точным и обеспечивать близкое приближение вычисленной двумерной проекции движения к реальной проекции этого движения на плоскость камеры. Существующие техники [3-6] показывают, что для корректного определения движения, относительные ошибки вы-

числения оптического потока [7] не должны превышать десяти процентов.

1. Постановка задачи исследования

Для шагающего робота, задача навигации из стартовой позиции в требуемую включает в себя необходимость выявления препятствий на пути следования и их преодоление.

Препятствия возникающие на пути следования робота могут быть объединены в две большие группы - те, которые тот способен преодолеть не изменяя траектории своего движения и те, которые возможно избежать только изменив траекторию следования. Будут рассматриваться только те препятствия, для преодоления которых роботу необходимо изменять траекторию движения. Можно выделить следующие подзадачи:

- а) обнаружение препятствия;
- б) определение расстояния до препятствия;
- в) определение скорости относительно препятствия;
- г) определение размеров препятствия;
- д) определение углового положения робота относительно препятствия.

Рассматривается мобильный шагающий робот, имеющий четыре ноги и перемещающийся по кинематической схеме близкой к схеме "земноводное". Кинематическая схема робота показана далее на рис. 1:

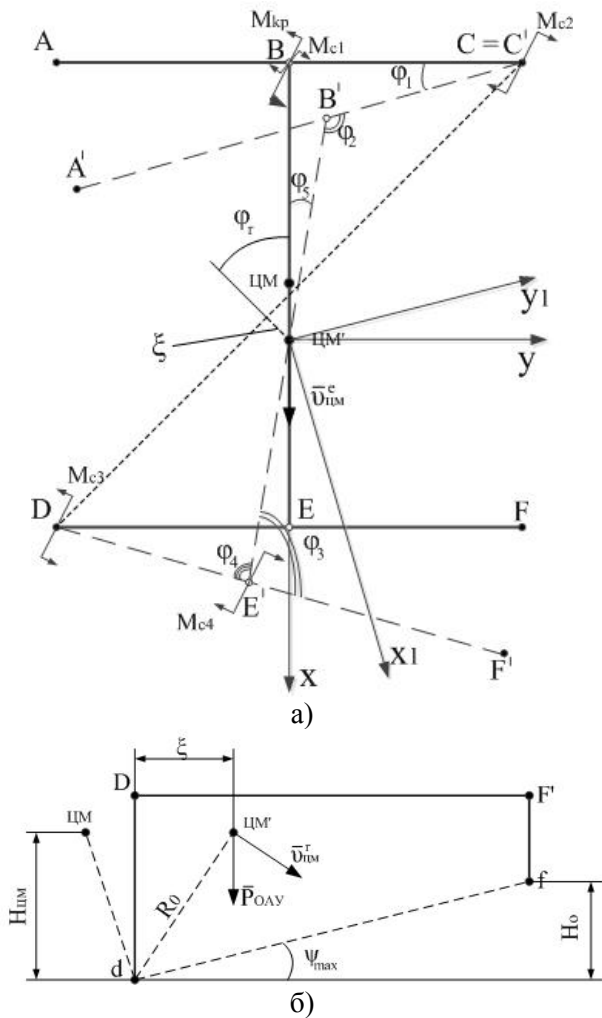


Рис. 1. Робот в горизонтальной плоскости (а) и плоскости опрокидывания (б)

где $A, B, B', C, C', D, E, E', F, F'$ – точки определяющие крайние положения кинематических звеньев, AC – ведущий мост, DF – задний мост; M_i – моменты вокруг соответствующих вертикальных осей, φ_i – углы между соответствующими кинематическими звеньями, ЦМ и $\text{ЦМ}'$ – центр масс в начальный момент времени после выполнения одного шага соответственно, ξ – смещение центра масс, R_0 – радиус опрокидывания, $\bar{v}_{\text{цм}}^e$ и $\bar{v}_{\text{цм}}^r$ – скорости центра масс относительно оси Y и R_0 соответственно, ψ_{max} – максимальный угол опрокидывания, $H_{\text{цм}}$ – высота центра масс, H_0 – высота поднятия ноги робота, P_{OAU} – сила тяжести робота, f и d – проекции соответствующих точек F и D на плоскость XY .

Робот совершает движение путем перемещения двух диагональных опор (Рис. 1 A и F) в то время как две другие опоры (Рис. 1 C и D) неподвижны. На Рис. 1 показан один шаг, опоры C и D неподвижны, опоры A и F движутся в положения A' и F' соответственно, исходное положение ЦМ так же движется в положение $\text{ЦМ}'$.

1.1. Новизна

Предлагается способ уменьшения требований к вычислительному модулю управляющему видеокamerой при получении стерео изображения путем использования одной подвижной камеры, вместо двух жестко закрепленных камер, для обнаружения препятствий на пути следования робота, а так же для определения его относительной скорости и углового положения. Это позволяет вдвое уменьшить требования к пропускной способности канала передачи данных либо, соответственно, вдвое меньшей тактовой частоте микроконтроллера, управляющего передачей данных.

2. Обнаружение препятствия

Препятствиями для робота может быть большое разнообразие физических объектов и их свойств [8–11]. Примерами препятствий на рельефе местности относящимися к двум различным типам могут служить растительность и грунт. Так, мелкая растительность не представляет для робота препятствия если может быть смята при движении, тем не менее тонкие упругие стебли могут затруднить прохождение по маршруту. Сухой грунт не представляет препятствия в отличие от пористой либо заболоченной почвы, при движении по которой робот может увязнуть и потерять способность функционировать. Обнаружение определенного типа препятствий требует отдельного подхода, поэтому необходимо ввести ограничения на типы препятствий, рассматриваемых в данной работе. Вводится допущение, что робот на пути следования к цели встречает только однородные сплошные препятствия имеющие высоту относительно рельефа местности, которые не могут быть преодолены в силу массогабаритных характеристик робота. Для преодоления таких препятствий робот будет вынужден изменить траекторию движения.

В своем составе робот содержит систему технического зрения, которой является подвижная видео камера, закрепленная на шатун таким образом, что может линейно перемещаться на расстояние $b=10\text{мм}$, и вычислительный модуль выполняющий управление камерой и обработку изображений. Введем ограничения на систему технического зрения, такие как получение изображений только в статике, пока робот неподвижен, механизм приводящий камеру в движение имеет только одну поступательную степень свободы, 95% наблюдаемой сцены статичны. Это позволяет получать стерео изображение с фиксированной базой имея на борту всего одну камеру, тем самым давая возможность вдвое снизить требования к пропускной способности канала

передачи данных с камеры, что в свою очередь позволяет значительно снизить энергопотребление системы получения изображений. Так же, введенные ограничения позволяют трактовать оптический поток как частичное решение задачи эпиллярной геометрии [12] по нахождению трехмерных координат точки по двум имеющимся проекциям этой точки на две плоскости соответственно.

Перед рассмотрением способа построения трехмерной картины наблюдаемой сцены на основании оптического потока, необходимо подробнее рассмотреть способ, с помощью которого в данной работе определяется сам оптический поток.

Выше было сказано о неполноте решения задачи эпиллярной геометрии, эта неполнота состоит в том, что оптический поток отдельной точки трактуется как величина рассогласования между проекциями этой точки на две соответствующие плоскости. Для полноты решения, необходимо ввести коэффициент пропорциональности, согласующий величину рассогласования с величиной оптического потока. В данной работе этот коэффициент равен единице, так как принято что крайних положения камеры трактуются как стереопара. Касательно несинхронности снимков следует сделать замечание, что при статичной сцене время снимка не играет роли, если снимки делаются в рамках допустимых режимов скорости работы камеры, от 5Гц до 25Гц. Так же, статичность сцены необходима для корректного определения линейных и угловых скоростей точек, так как движение относительно и движущийся предмет в поле зрения неподвижной камеры может быть трактован как движение самой камеры относительно неподвижного предмета.

2.1. Вычисление оптического потока

Оптический поток - это изображение видимого движения объектов, поверхностей или краев сцены, получаемое в результате перемещения наблюдателя (глаз или камеры) относительно сцены. Алгоритмы, основанные на оптическом потоке, — такие как регистрация движения, сегментация объектов, кодирование движений и подсчет рассогласования в стерео изображении, — используют движение объектов, поверхностей и краев.

Последовательности упорядоченных изображений позволяют оценивать движение либо как мгновенную скорость изображения, либо как дискретное смещение [13, 14].

Подробный анализ методов вычисления оптического потока проведен в [14], различные ме-

тоды рассматриваются как с точки зрения точности, так и с точки зрения плотности получаемого векторного поля. Методы, основанные на оптическом потоке, вычисляют движение между двумя кадрами, взятыми в момент времени t и $t+\Delta t$, в каждом пикселе. Эти методы называются дифференциальными, так как они основаны на приближении сигнала отрезком ряда Тейлора; таким образом, они используют частные производные по времени и пространственным координатам.

В случае размерности $2D+t$ (случай большей размерности аналогичны) пиксель в позиции (x,y,t) с интенсивностью $I(x,y,t)$ за один кадр будет перемещен на Δx , Δy и Δt соответственно, можно записать уравнение накладывающее ограничение на изменение яркости:

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t). \quad (1)$$

Считая, что перемещение достаточно мало, яркость пикселя $I(x,y,t)$ может быть записана с использованием ряда Тейлора:

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \Delta t + П.В.П \quad (2)$$

где П.В.П. - производные высших порядков. Из уравнения следует, что:

$$\frac{\partial I}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \Delta t = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\Delta t}{\Delta t} = 0, \quad (4)$$

откуда следует, что:

$$\frac{\partial I}{\partial x} V_x + \frac{\partial I}{\partial y} V_y + \frac{\partial I}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

где V_x и V_y компоненты скорости наблюдателя (камеры либо глаз) относительно сцены или, иными словами, оптический поток $I(x,y,t)$ и производные изображены $\frac{\partial I}{\partial x}$, $\frac{\partial I}{\partial y}$, $\frac{\partial I}{\partial t}$ в точке (x,y,t)

по соответствующим направлениям I_x , I_y , I_t , для которых может быть записано:

$$I_x V_x + I_y V_y = -I_t, \quad (6)$$

$$\nabla I^T \vec{V} = -I_t. \quad (7)$$

Такое уравнение для двух неизвестных имеет множество решений и не может быть однозначно разрешено. Это так называемая "проблема апертуры", для ее решения используются раз-

личные методы, в которых используется другой набор уравнений либо вводятся дополнительные ограничения. Все известные методы определения оптического потока вводят дополнительные ограничения. Методы определения оптического потока:

1. Метод Фазовой Корреляции - обработка изображений в частотной области с использованием обратной матрицы от нормализованной матрицы перекрестного спектра двух изображений;

2. Блочные методы - используют способы минимизации суммы квадратов разностей, или суммы абсолютных разностей, либо максимизацию нормализованной кросс-корреляции;

3. Дифференциальные методы - использование частных производных от изображения и\или искомого оптического потока.

2.1.1 Численная оценка методов оптического потока. Не смотря на множество существующих методов, новые продолжают появляться. Однако, есть значительный недостаток в количественной оценке существующих методов на одинаковом наборе входных данных. Кэрни и другие [15] обсуждают источники ошибок градиентных методов. Литтл и Верри [7] сравнивают свойства дифференциальных методов и предоставляют некоторые количественные оценки, но только для двух относительно простых синтетических тестовых случаев. Точность о которой они говорят не высока, средние относительные ошибки составляют 10% - 20%, средние ошибки определения углов 7 - 12 градусов в самых лучших случаях. Уиллик и Янг [16] рассматривают ограничения метода предложенного Горн и Чанком [17] а так же алгоритм предложенный Чанком [3, 18] и Нагель [19]. Далее будет рассмотрено девять из самых распространенных техник, включая дифференциальные методы, методы основанные на сопоставлении участков изображения, методы основанные на изменении энергии и изменении фазы, рассмотренных в работах Горн и Чанка [3, 18], Лукас и Канаде [4, 20], Ураш [5], Нагель [21], Анандан [22, 23], Син [6, 24], Хигер [25], Воксман [26], Флит и Джемсон [27, 28]. Несмотря на различия, многие из этих методов можно рассматривать концептуально в терминах трех этапной обработки:

1. Предварительная фильтрация с помощью ФНЧ, либо полосового фильтра, для того чтобы выделить структуру сигнала и увеличить соотношение сигнал\шум.

2. Выполнение основных вычислений, таких как вычисление пространственно-временных производных для измерения компонент скорости, либо вычисление корреляции поверхностей.

3. Получение векторного поля плоского оптического потока, вводятся допущения о гладкости и движения.

Для тестирования будут использованы следующие данные (рис. 2):

а) Синтетические синусоидальные данные, суперпозиция двух синусоидальных сигналов с длинами волн 6 пикселей, направлением распространения 54 и -27 градусов соответственно, скоростями 1.63 и 1.02 пикселя\кадр соответственно;

б) Движущийся на белом фоне черный квадрат со стороной 40 пикселей, скоростью 1.33 пикселя\кадр;

в) Плоское изображение дерева, движущееся различными способами со скоростью в среднем 1.73 пикселя\кадр;

г) Движение по трехмерной модели горного ландшафта с подвижными облаками в небе, скорость движения точек ландшафта до 4 пикселей\кадр, облака движутся равномерно и линейно со скоростью 1 пиксель\кадр;

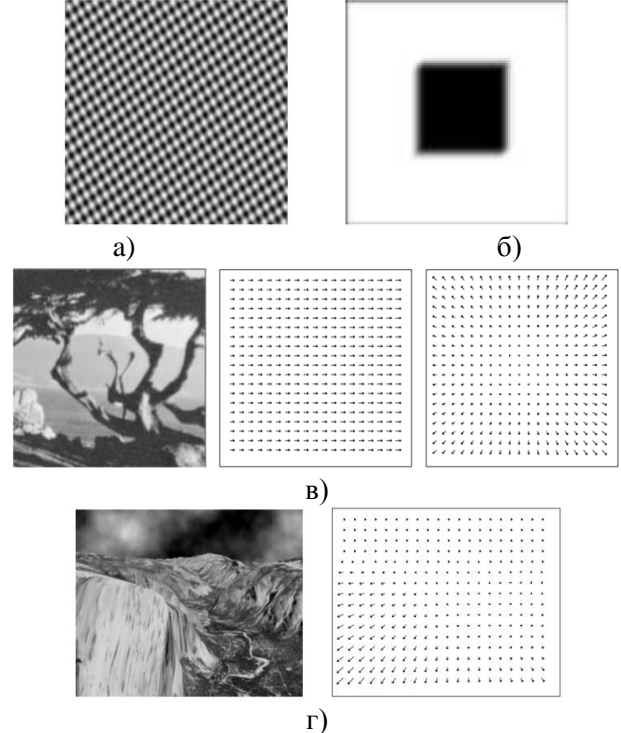


Рис. 2. Тестовые данные для оценки алгоритмов оптического потока

Результаты работы упомянутых выше алгоритмов приведены в табл. 1., ошибка приведена в градусах.

Таблица 1

Численная оценка методов оптического потока

Метод	Средн. ошибка, град.	Среднекв. отклон., град.	Плотн. вект. поля, %
а) Синусоидальный сигнал			
Горн-Чанк	4.19	0.50	100

Метод	Средн. ошибка, град.	Среднекв. отклон., град.	Плотн. вект. поля, %
Лукас-Канаде	2.47	0.16	100
Ураш	2.59	0.71	100
Нагель	2.55	0.93	100
Анандан	30.8	5.45	100
Син	2.24	0.02	100
Воксман	64.26	26.14	12.8
Флит	0.03	0.01	100
б) Движущийся квадрат			
Горн-Чанк	47.21	14.60	100
Лукас-Канаде	0.21	0.16	7.9
Ураш	0.15	0.10	26.1
Нагель	34.57	14.38	100
Анандан	31.46	18.31	100
Син	46.12	18.64	81.9
Хигер	6.16	4.02	29.3
Воксман	8.78	4.17	1.1
Флит-Джепсон	0.18	0.13	12.6
в) Изображение дерева			
Горн-Чанк	38.72	27.67	100
Лукас-Канаде	0.56	0.58	13.1
Ураш	0.62	0.52	100
Нагель	2.44	3.06	100
Анандан	4.54	3.10	100
Син	1.11	0.89	99.6
Хигер	8.10	12.30	77.9
Воксман	6.66	10.72	1.9
Флит-Джепсон	0.32	0.38	74.5
г) Горный ландшафт			
Горн-Чанк	32.43	30.28	100
Лукас-Канаде	4.10	9.58	35.1
Ураш	10.44	15.0	100
Нагель	11.71	10.59	100
Анандан	15.84	13.46	100
Син	12.90	11.57	97.8
Хигер	20.89	34.26	64.2
Воксман	20.32	20.6	7.4
Флит-Джепсон	4.29	11.24	34.1

Результат работы алгоритмов на реальных данных сложно точно оценить так как погрешности колеблются в пределах 10% - 20%. Так же, ошибки не всегда могут быть обнаружены, когда разница между реальной скоростью и ее проекцией не могут быть точно рассчитаны. К техникам которые дают относительно хороший результат

на реальных относятся дифференциальные и фазовые методы Горн-Чанк, Лукас-Канаде, Ураш а так же Флит-Джепсон.

2.1.2 Метод Лукаса-Канаде. Метод Лукас-Канаде позволяет точно, по сравнению с другими, вычислить оптический поток а так же хорошо оптимизируется под различные архитектуры микроконтроллеров, в отличие от Горн-Чанк либо Флит Джепсон. Алгоритм Лукаса-Канаде менее чувствителен к шуму на изображениях, чем поточечные методы, однако является сугубо локальным и не может определить направление движения пикселей внутри однородных областей. Предположим, что смещение пикселей между двумя кадрами невелико.

Рассмотрим пиксель p , тогда, оптический поток должен быть одинаков для всех пикселей, находящихся в окне M с центром в p . А именно, вектор оптического потока (V_x, V_y) в точке p должен быть решением системы уравнений:

$$\begin{cases} I_x(q_1)V_x + I_y(q_1)V_y = -I_t(q_1) \\ I_x(q_2)V_x + I_y(q_2)V_y = -I_t(q_2) \\ \dots \\ I_x(q_n)V_x + I_y(q_n)V_y = -I_t(q_n) \end{cases}, \quad (8)$$

где q_1, q_2, \dots, q_n - пиксели внутри окна, $I_x(q_i), I_y(q_i), I_t(q_i)$ - частные производные изображения I по координатам x, y, t вычисленные в точке q_i . Это уравнение может быть записано в матричной форме вида $Av=b$, где:

$$A = \begin{bmatrix} I_x(q_1) & I_y(q_1) \\ I_x(q_2) & I_y(q_2) \\ \vdots & \vdots \\ I_x(q_n) & I_y(q_n) \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} -I_t(q_1) \\ -I_t(q_2) \\ \vdots \\ -I_t(q_n) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Полученная переопределенная система решается с помощью метода наименьших квадратов.

Таким образом:

$$A^T Av = A^T b, \quad (10)$$

$$v = (A^T A)^{-1} A^T b, \quad (11)$$

откуда можно получить:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \left[\begin{matrix} \sum_i I_x(q_i)^2 & \sum_i I_x(q_i)I_y(q_i) \\ \sum_i I_x(q_i)I_y(q_i) & \sum_i I_y(q_i)^2 \end{matrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_i I_x(q_i)I_t(q_i) \\ -\sum_i I_y(q_i)I_t(q_i) \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.2. Определение расстояния до препятствия и скорости

В результате определения оптического потока для последовательно идущих изображений могут быть получены относительные скорости отдельных зон текущего изображения относительно предыдущего.

Данная информация может быть использована для определения границ препятствия, но не достаточна для определения положения робота относительно препятствия.

Информационным признаком препятствия в кадре является движение центров минимум трех соседних окон M_i со скоростью V_{M_i} , превышающей заданное пороговое значение $V_{M_i_{max}}$:

$$V_{M_i_{max}} = k \cdot R_{min} \quad (13)$$

где $V_{M_i_{max}}$ - пороговая скорость окна M_i , при которой окно M_i начинает считаться частью препятствия, $k=1.22$ коэффициент пропорциональности, $R_{min}=5.1 \cdot 10^{-1} \text{ м}$ минимальный радиус разворота робота.

Границы препятствия необходимо определить за тем, чтобы оценить его размеры и выработать соответствующее управление. Роботу необходимо обойти препятствие с минимальными затратами энергии и за минимально возможное время. Точность определения границ препятствия зависит от разрешающей способности камеры а так же от расстояния до препятствия.

На предельном расстоянии $S_{M_i_{max}}=6.2 \cdot 10^{-1} \text{ м}$, ближе которого предмет считается препятствием, что определено свойствами использованной камеры, один пиксель покрывает собой квадрат со стороной $3.75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Размер окна, для которого вычисляется оптический поток равен 5×5 пикселей, точность определения границ препятствия Δ_{obst_v} по вертикали и Δ_{obst_h} по горизонтали составляет $3.75 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ соответственно.

Алгоритм обнаружения и определения расстояния до препятствий в целом можно описать как расчет оптического потока для всего изображения, выделение областей(кластеров) движущихся со скоростью выше установленного порога, определение их границ в координатах изображения, фильтрация кластеров которые можно считать выбросами получившимися в результате обработки шума, для отфильтрованных больших кластеров вычисление ближайшей к камере точки а так же центроидов. На основании данных о размерах и близости видимых препятствий можно синтезировать соответствующее управление роботом. Для вычисления скорости робота Vp_i в момент времени n относительно ближайших точек C_{in} препятствий C_i , необходи-

мо провести дифференцирование дискретного сигнала по времени с периодом квантования $T_{кв}$, зависящим от частоты кадров камеры. Частота камеры в данной работе фиксированная, и составляет 20 кадров в секунду, что определяет время квантования равным 50 миллисекунд. В общем виде можно записать:

$$Vp_i = \frac{\Delta Zp_i}{\Delta t} = \frac{Zp_i[n] - Zp_i[n-1]}{T_{кв}}, \quad (14)$$

где ΔZp_i - изменение координаты Z (глубины) ближайшей точки препятствия, $Zp_i[n]$ текущее значение глубины, $Zp_i[n-1]$ предыдущее значение глубины.

2.3. Определение размеров препятствия

Размеры препятствия могут быть определены несколькими способами, очевидным является расчет с помощью предварительной калибровки камеры на референсном объекте.

Другим является расчет с помощью известных параметров камеры, таких как расстояние от линзы до фотоматрицы, физические размеры пикселя, расстояние между пикселями, сила линзы и ее фокусное расстояние. С одной стороны, расчет по известным параметрам камеры является более точным, тем более что часть параметров можно получить с помощью процедуры калибровки [29], но с другой стороны, подход требует очень точного знания параметров камеры, что недостижимо в условиях когда камера является закрытым модулем, габариты и размеры составляющих которого нельзя измерить не повредив сам модуль. Неточное задание размеров пикселя либо неточность при задании фокусного расстояния линзы влекут за собой недопустимые погрешности при расчетах.

Подход основанный на калибровке камеры с помощью референсного объекта с точно известными размерами и находящегося на точно измеренном расстоянии позволяет избежать ошибок вычислений, связанных с отклонением параметров камеры от номинальных, потому что при таком расчете будут учтены актуальные значения параметров конкретного экземпляра камеры.

2.4. Определение углового положения относительно препятствия

Как только определены центроиды препятствий и оптический поток между двумя кадрами, следующим шагом является представление данной информации в виде собственных векторов и их производных. Для этого необходимы калибровочные параметры камеры, которые могут быть получены несколькими способами.

Классическая процедура калибровки камеры подразумевает вычисление матрицы внутренних параметров камеры M_I :

$$M_I = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где c_x, c_y - координаты оптического центра, f_x, f_y - фокальные расстояния по осям X и Y соответственно.

Затем полученная матрица используется в модели пинхол-камеры в совокупности с различными параметрами, такими как фокусное расстояние, оптический центр, радиальное и тангенциальное искажения и другие [29, 30], для вычисления матрицы внешних параметров M_E (16).

$$M_E = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где r_{ij} матрица поворота 3x3 содержащая углы Эйлера-Крылова, t_i - линейное перемещение.

Была использована end-to-end процедура калибровки, позволяющая корректно вычислить необходимые параметры. Когда известны собственные вектора и их производные, угловая скорость вычисляется как решение эллиптического уравнения в частных производных, так как процесс приводящий к изменению оптического потока является стационарным. Соотносятся производные по времени от собственных векторов центроидов препятствий, либо матрицы оптического потока в случае отсутствия препятствий, относительно неподвижной O_H и связанной O_{CB} систем координат:

$$\left. \frac{\partial \underline{u}}{\partial t} \right|_{O_H} = 0 = \left. \frac{\partial \underline{u}}{\partial t} \right|_{O_{CB}} + \underline{\omega} \wedge \underline{u}, \quad (17)$$

где \underline{u} - собственный вектор препятствия, $\underline{\omega}$ - угловая скорость O_{CB} относительно O_H , было введено допущение что препятствия неподвижны в O_H . Перепишем (17) в компонентной форме относительно O_{CB} :

$$\begin{bmatrix} 0 & u_{3cb} & -u_{2cb} \\ -u_{3cb} & 0 & u_{1cb} \\ u_{2cb} & -u_{1cb} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{1cb} \\ \omega_{2cb} \\ \omega_{3cb} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial u_{1cb}}{\partial t} \\ \frac{\partial u_{2cb}}{\partial t} \\ \frac{\partial u_{3cb}}{\partial t} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Таким образом, три линейно зависимых уравнения могут быть записаны для каждого центроида, что приводит к $N \times 3$ линейных уравнений, где N - количество центроидов препятствий, либо количество окон оптического потока всего кадра в случае когда препятствий не наблюдается. Такая система линейных уравнений $N \times 3$ может быть решена методом наименьших квадратов.

Выводы

Была рассмотрена методика обнаружения препятствий на пути следования мобильного шагающего робота с помощью подвижной видеокамеры. Было показано как одна подвижная камера может быть использована для получения стерео изображения вместо пары жестко закрепленных камер, тем самым снижая требования к вычислительной мощности канала передачи данных. Был рассмотрен способ обнаружения препятствия, вычисления его границ, относительной скорости и углового положения. Рассмотрена задача определения оптического потока и приведены результаты сравнения различных техник.

Список использованной литературы

1. Horn, K. B. Robot Vision [Text] / K. B. Horn.- Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1986.- 509 с.- ISBN ISBN:0-262-08159-8
2. Verri, A. Against quantitative optical flow [Text] / Verri A. , Poggio T. London: Proc. IEEE ICCV, 1987.- 171-180 с.
3. Schunck, B. G. Image flow continuity equations for motion and density [Text] / B. G. Schunck // Proc. IEEE Workshop on Visual Motion.- 1986.- № .- С. 89-94.
4. Lucas, B.D. Generalized Image Matching by the Method of Differences [Text] / B.D. Lucas // . PhD Dissertation, Dept. of Computer Science, Carnegie-Mellon University.- 1984.- № .- С.
5. Uras, S. A computational approach to motion perception [Text] / S. Uras, F. Girosi, A. Verri [та ≥н.] // Biol. Cybern.- 1988.- № 60.- С. 79-97.
6. Singh, A. An estimation-theoretic framework for image flow computation [Text] / A. Singh // Proc. IEEE ICCV, Osaka.- 1990.- № .- С. 168-177.
7. Little, J. J. Analysis of differential and matching methods for optical flow [Text] / J. J. Little, A. Verri // IEEE Workshop on Visual Motion, Irvine CA.- 1989.- № .- С. 173-180.
8. Batavia, P. Obstacle detection in smooth high curvature terrain [Text] / P. Batavia, S. Singh, // In Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation.- 2002.- № .- С.

9. Matthies, L. Obstacle detection for unmanned ground vehicles: a progress report [Text] / L. Matthies, A. Kelly, T. Litwin [та ін.] // *Robotics Research*. – 1996. – № 7. – С.
10. Wolff, L. Polarization phased-based method for material classification and object recognition in computer vision [Text] / L. Wolff // In *IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*. – 1996. – С.
11. Zhang, Z. Qualitative obstacle detection [Text] / Z. Zhang, R. Weiss, A.R. Hanson [та ін.] // In *IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*. – 1994. – № . – С. 554–559.
12. Boufama, B. Epipole and fundamental matrix estimation using the virtual parallax property [Text] / B. Boufama, R. Mohr, // *Proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision*, IEEE Computer Society Press, Boston, MA. – 1995. – № 5. – С. 1030–1036.
13. Barron, J. L. Performance of optical flow techniques [Text] / J. L. Barron, D. J. Fleet, S. S. Beauchemin [та ін.] // *International Journal of Computer Vision*. – 1994. – № 12 (1). – С. 43–77.
14. Fleet, D. J. Optical flow estimation [Text] / D. J. Fleet, Y. Weiss // *Handbook of Mathematical Models in Computer Vision*. – 2006. – № . – С. 237–257.
15. Kearney, J. K. Optical flow estimation: An error analysis of gradient-based methods with local optimization [Text] / J. K. Kearney, W. B. Thompson, D. L. Boley // *IEEE Trans. on PAMI*. – 1997. – № 9. – С. 229–244.
16. Willick, D. Experimental evaluation of motion constraints equations [Text] / D. Willick, Y. H. Yang, // *CVGIP: Image Understanding*. – 1991. – № 54. – С. 206–214.
17. Horn, B. K. Determining optical flow [Text] / B. K. Horn, B. G. Schunck, // *AI*. – 1981. – № 17. – С. 185–204.
18. Schunck, B. G. The motion constraint equation for optical flow [Text] / B. G. Schunck // *Proc. ICPR Montreal*. – 1984. – № . – С. 20–22.
19. Nagel, H. H. On a constraint equation for the estimation of displacement rates in image sequences [Text] / H. H. Nagel // *IEEE Trans. PAMI*. – 1989. – № 11. – С. 13–30.
20. Lucas, B. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [Text] / B. Lucas, T. Kanade, // *Proc. DARPA IU Workshop*. – 1981. – № . – С. 121–130.
21. Nagel, H. H. On the estimation of optical flow. Relations between different approaches and some new results [Text] / H. H. Nagel // *AI*. – 1987. – № 33. – С. 299–324.
22. Ancona, N. A fast obstacle detection method based on optical flow [Text] / N. Ancona // In *Proceedings of ECCV, Santa Margherita Ligure, Italy*. – 1992. – № . – С. 267–271.
23. Barman, H. Estimation of velocity, acceleration and disparity in time sequences [Text] / H. Barman, L. Haglund, H. Knutsson [та ін.] // In *IEEE Proceedings of Workshop on Visual Motion*, Irvine, California. – 1992. – № . – С. 44–51.
24. Singh, A. Optic Flow Computation A Unied Perspective [Text] / A. Singh // *IEEE Computer Society Press*. – 1992. – № . – С.
25. Heeger, D. J. Optical flow using spatiotemporal filters [Text] / D. J. Heeger // *Int. J. Comp. Vision*. – 1988. – № 1. – С. 279–302.
26. Waxman, A. M. Convected activation profiles and receptive fields for real time measurement of short range visual motion [Text] / A. M. Waxman, , F. Bergholm // *Proc. IEEE CVPR, Ann Arbor*. – 1988. – № . – С. 717–723.
27. Fleet, D. J. Computation of component image velocity from local phase information [Text] / D. J. Fleet, A. D. Jepson, // *Int. J. Comp. Vision*. – 1990. – № 5. – С. 77–104.
28. Fleet, D. J. Measurement of Image Velocity [Text] / D. J. Fleet // *Kluwer Academic Publishers, Norwell*. – 1992.
29. Camera Calibration Toolbox for Matlab [Електронний ресурс] // Available online. – режим доступу: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.
30. Pratt, W. K. Digital Image Processing [Text] / W. K. Pratt // *John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA*. – 2007. – № . – С.

References

1. Horn, B. K. P., (1986) *Robot Vision*. MIT Press, Cambridge
2. Verri, A., Poggio, T., (1987) Against quantitative optical flow. *Proc. IEEE ICCV, London*, pp. 171–180
3. Schunck, B. G., (1986) Image flow continuity equations for motion and density. *Proc. IEEE Workshop on Visual Motion, Charleston*, pp. 89–94
4. Lucas, B.D., (1984) *Generalized Image Matching by the Method of Differences*. PhD Dissertation, Dept. of Computer Science, Carnegie-Mellon University
5. Uras, S., Giroso, F., Verri, A., Torre, V., (1988) A computational approach to motion perception. *Biol. Cybern.* 60, pp. 79–97
6. Singh, A., (1990) An estimation-theoretic framework for image flow computation. *Proc. IEEE ICCV, Osaka*, pp. 168–177
7. Little, J. J., Verri A., (1989) Analysis of differential and matching methods for optical flow. *IEEE Workshop on Visual Motion, Irvine CA*, pp. 173–180

8. Batavia, P., Singh, S., (2002) Obstacle detection in smooth high curvature terrain. In Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation (ICRA '02)
9. Matthies, L., Kelly, A., Litwin, T., Tharp, G. (1996) Obstacle detection for unmanned ground vehicles: a progress report. Robotics Research 7, Springer-Verlag.
10. Wolff, L., (1996) Polarization phased-based method for material classification and object recognition in computer vision. In IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition.
11. Zhang, Z., Weiss, R., Hanson, A.R., (1994) Qualitative obstacle detection. In IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 554–559.
12. Boufama, B., Mohr, R., (1995) Epipole and fundamental matrix estimation using the virtual parallax property, Proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision, IEEE Computer Society Press, Boston, MA, pp. 1030–1036
13. Barron, J. L., Fleet, D. J., Beauchemin, S. S., (1994) Performance of optical flow techniques. International Journal of Computer Vision 12 (1), pp. 43–77
14. Fleet, D. J., Weiss, Y., (2006) Optical flow estimation. Handbook of Mathematical Models in Computer Vision, pp. 237–257
15. Kearney, J. K., Thompson, W. B., Boley D. L., (1997) Optical flow estimation: An error analysis of gradient-based methods with local optimisation. IEEE Trans. on PAMI 9, pp. 229–244
16. Willick, D., Yang Y. H., (1991) Experimental evaluation of motion constraints equations. CVGIP: Image Understanding, 54, pp. 206–214
17. Horn, B. K. P., Schunck, B. G., (1981) Determining optical flow. AI 17, pp. 185–204
18. Schunck, B. G., (1984) The motion constraint equation for optical flow. Proc. ICPR Montreal, pp. 20–22
19. Nagel, H. H., (1989) On a constraint equation for the estimation of displacement rates in image sequences. IEEE Trans. PAMI 11, pp. 13–30
20. Lucas, B., Kanade, T., (1981) An iterative image registration technique with an application to stereo vision. Proc. DARPA IU Workshop, pp. 121–130
21. Nagel, H. H., (1987) On the estimation of optical flow. Relations between different approaches and some new results. AI 33, pp. 299–324
22. Ancona, N., (1992) A fast obstacle detection method based on optical flow. In Proceedings of ECCV, pages 267–271, Santa Margherita Ligure, Italy
23. Barman, H., Haglund, L., Knutsson, H., Granlund, G. H. (1992) Estimation of velocity, acceleration and disparity in time sequences. In IEEE Proceedings of Workshop on Visual Motion, pages 44–51, Irvine, California
24. Singh, A., (1992) Optic Flow Computation A Unied Perspective. IEEE Computer Society Press
25. Heeger, D. J., (1988) Optical flow using spatiotemporal filters. Int. J. Comp. Vision 1, pp. 279–302
26. Waxman, A. M., Wu, J., Bergholm, F., (1988) Convected activation profiles and receptive fields for real time measurement of short range visual motion. Proc. IEEE CVPR, Ann Arbor, pp. 717–723
27. Fleet, D. J., Jepson, A. D., (1990) Computation of component image velocity from local phase information. Int. J. Comp. Vision 5, pp. 77–104
28. Fleet, D. J., (1992) Measurement of Image Velocity. Kluwer Academic Publishers, Norwell
29. Camera Calibration Toolbox for Matlab. Available online: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.
30. Pratt, W. K., (2007) Digital Image Processing; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA

USAGE OF A TECHNICAL VISION UNIT IN A MOBILE WALKING ROBOT CONTROL SYSTEM

A. S. Kulik, O. M. Radomskyi

National Aerospace University named after M. Ye. Zhukovsky "KhAI"

Abstract. *Overviewed technical vision unit usage for solving walking robot's navigational task and, also, determination of the robot's angular orientation relative to observed scene. Shown, that single moving camera can be used for a stereo image acquisition with future computation of optical flow, instead of rigid stereo-camera module. That allows to minimize computational requirements of the data transfer unit. Shown basic overview of the robot's kinematic model and walking principle. Described general task of optical flow computation. Provided overview of optical flow computation principle and results of quantitative comparison of nine different techniques, including instances of differential methods, region-based matching energy-based and phase-based techniques namely those of Horn and Schunck, Lucas and Kanade, Uras et al., Nagel, Anandan, Singh, Heeger, Waxman et al. and Fleet and Jepson. Shown Lucas-Kanade approach for*

optical flow computation technique. Provided general principle and implementation for obstacle avoidance basing on optical flow technique, provided quantitative results implemented in current robot. Shown next stages of obstacle avoidance: obstacle detection by means of optical flow relative velocities threshold ; distance to the obstacle determination by means of known stereo-image parameters; obstacle relative speed determination by means of optical flow of obstacle and it's direction and position; obstacle size, also by means of optical flow and known configuration of scene, and relative to robot angular position by means of optical eigenvectors computation with future differentiation and solving Poisson's equation.

Keywords: walking robot, obstacle detection, optical flow.

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНОГО КРОКУЮЧОГО РОБОТА

А. С. Кулік, О. М. Радомський

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "ХАІ"

Анотація. Розглянуто застосування системи технічного зору для вирішення навігаційної задачі, а також для визначення орієнтації мобільного крокуючого робота відносно навколишнього середовища. Показано, що одна рухома камера може бути застосована для отримання стерео зображення із подальшим обчисленням оптичного потоку, замість пари жорстко закріплених камер, що дозволяє знизити вимоги до обчислювальної потужності каналу передачі даних з модуля технічного зору. Розглянуто наступні етапи подолання перешкоди: виявлення перешкоди; визначення відстані до перешкоди; визначення швидкості відносно перешкоди; визначення розмірів перешкоди і кутового положення робота щодо перешкоди. Розглянуто задачу визначення оптичного потоку. Наведено результати кількісної оцінки різних існуючих технік визначення оптичного потоку.

Ключові слова: крокуючий робот, виявлення перешкоди, оптичний потік.

Получено 12.04.2017



Кулік Анатолій Степанович, доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедрою систем управління летательними апаратами Національного аерокосмічного університета ім. Н. Е. Жуковського "ХАІ". Ул. Чкалова, 17, Харків, Україна, E-mail: anatoly.kulik@gmail.com, тел. +38-057-788-43-33

Anatoly Kulik, Dr. of Science, Professor, Head of the Department of Aircraft Control Systems, National Aerospace University KhAI, Chkalova str., 17, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-8253-8784



Радомський Олександр Николаевич, аспірант кафедри систем управління летательними апаратами Національного аерокосмічного університета ім. Н. Е. Жуковського "ХАІ". Ул. Чкалова, 17, Харків, Україна, E-mail: o.radomskiy@gmail.com, тел. +38-099-959-31-79

Oleksandr Radomskiy, postgraduate of the Department of Aircraft Control Systems, National Aerospace University KhAI, Chkalova str., 17, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-9675-3098