

В. П. Носков, канд. тех. наук, заведующий сектором НИИ СМ, доц. кафедры СМ7, noskov_mstu@mail.ru,
Д. В. Губернаторов, магистр, gubernatorovdanil@gmail.com,
 Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
 (национальный исследовательский университет)

Экстремальная навигация по 3D-изображениям в мобильной робототехнике

Рассмотрена актуальная задача определения всех шести координат текущего положения мобильного робота (беспилотного летательного аппарата) по 3D-дальномерным изображениям (объемным облакам точек), формируемым бортовым 3D-лазерным сенсором в телесном угле обзора при движении (полете) в неизвестной среде. Предложен алгоритм экстремальной навигации, основанный на использовании методов многомерной оптимизации. Описаны правила вычисления используемого при оптимизации функционала разности 3D-изображений внешней среды. Исследована форма функционала разности 3D-изображений для различных сред (помещения, индустриально-городская среда, пересеченная и лесистая местности). Сформулированы требования к характеристикам сенсора и геометрии внешней среды, выполнение которых обеспечивает корректную постановку и решение задачи экстремальной навигации. Описаны оптимальные способы сканирования окружающего пространства и обоснованы условия, выполнение которых обеспечивает решение навигационной задачи предложенным алгоритмом в реальном времени (в темпе движения) при обработке 3D-изображений, формируемых современными 3D-лазерными сенсорами. В частности, описана зависимость между частотой формирования 3D-изображений и угловыми и линейными скоростями движения, обеспечивающая попадание в многомерный интервал унимодальности функционала разности 3D-изображений, что гарантирует прямой поиск его глобального минимума в реальном времени. Опробованы различные методы прямого поиска глобального минимума функционала и выбраны наиболее быстродействующие для рассматриваемого случая. Выполнена оценка точности решения задачи навигации и предложен способ снижения накапливаемой ошибки, основанный на использовании для коррекции вычисленного значения текущих координат более "старого" 3D-изображения, имеющего пересечение зоны обзора с зоной обзора текущего изображения. Предложенный способ, являющийся модификацией метода опорных изображений, позволяет снизить суммарную ошибку, растущую пропорционально числу циклов решения задачи экстремальной навигации, до значений, обеспечивающих автономное функционирование транспортных роботов и БПЛА в заранее не подготовленных и неизвестных средах. Эффективность предложенных алгоритмических и разработанных программно-аппаратных средств экстремальной навигации подтверждена натурными экспериментами, проведенными в реальных условиях различных сред.

Ключевые слова: лазерный сенсор, 3D-дальномерное изображение, экстремальная навигация, задача многомерной оптимизации

Введение

Центральной и наиболее актуальной для востребованной сейчас автономной робототехники является навигационная задача, решаемая бортовыми средствами. Наиболее эффективными с точки зрения точности и полноты ее решения являются средства видеонавигации на основе светолокационных лазерных сенсоров. Существует множество методов и алгоритмов решения навигационной задачи по данным лазерного сенсора [1–20]. В работах [4–6, 8] предложен эффективный способ навигации цехового транспортного робота по данным 2D-лазерного сенсора, который в процессе движения периодически формирует в полярной системе координат 2D-дальномерные изображения — множество попавших в зону обзора точек внешней среды:

$$D = \{ \langle d_i, \alpha_i \rangle, i = 1, 2, \dots, n, \}$$

где d_i и α_i — измеренная дальность и угол сканирования по азимуту для i -го измерения; n — число точек в изображении.

Зона обзора в данном случае представляет собой плоский сектор, параллельный плоскости перемещений. Для каждой пары со-

седних изображений вычисляются приращения трех координат (двух линейных и одной угловой — курса), полностью определяющие положение робота в плоскости перемещений. Для вычисления искомых приращений координат использовался алгоритм экстремальной навигации, в основу которого положен поиск глобального минимума функционала, представляющего собой разность двух дальномерных изображений на множестве возможных приращений координат. Для корректной работы данного алгоритма необходимо выполнение следующих условий: не пустое пересечение зон обзора рассматриваемой пары дальномерных изображений и пригодность геометрии внешней среды для методов экстремальной навигации [6, 8]. Количественные оценки данных условий определяются характеристиками функционала для данной рабочей зоны (интервал унимодальности, выраженность экстремума) и характеристиками используемого лазерного сенсора (сектор обзора, подробность и точность измерений). Поиск глобального минимума функционала выполнялся в два этапа. Сначала путем перебора

с максимально допустимым шагом в трехмерном пространстве возможных положений для каждой координаты находились интервалы унимодальности в локальной области глобального минимума функционала, а затем прямым поиском — его глобальный минимум. Данный способ сканирования пространства и алгоритм экстремальной навигации применим только для движения в плоских средах (цеховые условия, помещения, горизонтальная инфраструктура индустриально-городской среды) без перемещения по высоте и колебаний по крену и дифференту, когда обеспечивается условие пересечения плоских горизонтальных секторов обзора 2D-лазерного сенсора. При движении в индустриально-городской среде с перемещением еще и по высоте и колебаниями по крену и дифференту (индустриально-городские среды, подвергшиеся разрушению, лестницы, аппарели, полет БПЛА) необходимо использовать 3D-лазерные сенсоры, формирующие 3D-дальнометрические изображения. В этих условиях эффективно себя показали алгоритмы, основанные на выделении в 3D-изображениях плоских объектов (стен, потолков, дорог и т. д.), которыми изобилуют урбанизированные среды, и использовании их для решения навигационной задачи [8, 17–20]. В естественной же среде (пересеченная и лесистая местность) плоские объекты отсутствуют, и для видеонавигации наиболее подходящим является описанный выше метод экстремальной навигации, но с решением полной навигационной задачи (вычисление трех линейных и трех угловых координат). Однако данная задача не является тривиальной, так как первый этап — этап поиска интервала унимодальности в локальной области глобального минимума функционала — связан с недопустимо большим объемом вычислений вследствие шестимерности пространства поиска. Это делает невозможным решение навигационной задачи в реальном времени (в темпе движения). Известные методы, например, основанные на часто используемом "Итерационном алгоритме ближайших точек" (Iterative Closest Points — ICP) [3, 12, 14], требуют выполнения на каждой итерации трудоемкой операции поиска ближайших точек, что также затрудняет решение задачи в реальном времени, особенно для больших 3D-изображений, формируемых современными сенсорами. Поэтому востребованы методы и программно-алгоритмические средства, решающие шестимерную задачу экстремальной навигации в реальном времени.

Полная навигационная задача и вычисление функционала разности 3D-дальнометрических изображений

Рассмотрим условия применения метода экстремальной навигации для движения с изменением всех шести координат с использованием данных 3D-лазерного сенсора. Данные сенсоры в большинстве случаев формируют 3D-дальнометрические изображения, представляющие собой множество точек внешней среды, попавших в телесный угол обзора, в сферической системе координат:

$$\mathbf{D} = \{ \langle d_{ij}, \alpha_i, \beta_j \rangle \}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m,$$

где d_{ij} — дальность ij -го измерения; α_i, β_j — углы сканирования по азимуту и возвышению; i, j — номера дискретных значений углов сканирования; n, m — число дискретных значений углов сканирования.

Рассмотрим следующую задачу экстремальной навигации:

$$\text{Дано: } \mathbf{D}_1 = \{ \langle d_{1i,j}, \alpha_{1i,j}, \beta_{1i,j} \rangle \} \text{ и } \mathbf{D}_2 = \{ \langle d_{2i,j}, \alpha_{2i,j}, \beta_{2i,j} \rangle \}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m,$$

где $\mathbf{D}_1$ и $\mathbf{D}_2$ — 3D-дальнометрические изображения внешней среды, сформированные соответственно в первом и во втором положениях сенсора (робота).

Требуется: найти $\Delta_{1,2} = \langle \Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta Z_{12}, \Delta \gamma_{12}, \Delta \theta_{12}, \Delta \phi_{12} \rangle$ — вектор линейных и угловых перемещений робота из первого положения во второе в системе координат, связанной с первым положением.

Для корректной постановки задачи также необходимо выполнение следующих условий-ограничений [6, 8]:

- 1) не пустое достаточное пересечение зон обзора сенсора в первом и во втором положениях при снятии дальнометрических изображений;
- 2) достаточная точность и подробность дальнометрических изображений;
- 3) геометрическая пригодность внешней среды.

Решение задачи экстремальной навигации в данном случае заключается в поиске такого значения вектора $\Delta_{1,2}$, при котором дальнометрические изображения $\mathbf{D}_1$ и $\mathbf{D}_2$ максимально хорошо совмещаются по области их пересечения, так как это происходит как раз при искомом значении вектора $\Delta_{1,2}$. Поиск значения вектора $\Delta_{1,2}$, при котором дальнометрические изображения $\mathbf{D}_1$ и $\mathbf{D}_2$ максимально хорошо совмещаются по области их пересечения, сводится к задаче оптимизации, т. е. к задаче поиска глобального

оптимума соответствующего функционала на множестве всех возможных значений вектора $\Delta_{1,2}$. Сформулируем правила вычисления такого функционала $\Delta D_{12}(\Delta_{1,2})$ — функционала разности двух изображений $\mathbf{D}_1$ и $\mathbf{D}_2$ на множестве возможных значений вектора $\Delta_{1,2}$ (рис. 1).

Возьмем произвольное i, j -е измерение $\langle d_{2i,j}, \alpha_{2i,j}, \beta_{2i,j} \rangle$ из $\mathbf{D}_2$ и выполним следующие преобразования при условии, что сенсор переместился в соответствии с произвольным вектором $\Delta_{1,2}$ (не обязательно совпадающим с искомым):

$$\begin{pmatrix} x_1(i, j) \\ y_1(i, j) \\ z_1(i, j) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \\ \Delta Z_{12} \end{pmatrix} + \mathbf{A}_{xyz}(\Delta\gamma_{12}, \Delta\theta_{12}, \Delta\varphi_{12}) \begin{pmatrix} x_2(i, j) \\ y_2(i, j) \\ z_2(i, j) \end{pmatrix}.$$

Здесь

$\begin{pmatrix} x_2(i, j) \\ y_2(i, j) \\ z_2(i, j) \end{pmatrix}$ — вектор i, j -го измерения из $\mathbf{D}_2$

(вектор $\overline{O_2C_2}$ на рис. 1), преобразованный из сферической системы координат в декартову систему $O_2X_2Y_2Z_2$, связанную с сенсором во втором положении;

$\mathbf{A}_{xyz}(\Delta\gamma_{12}, \Delta\theta_{12}, \Delta\varphi_{12})$ — обобщенная матрица поворотов вокруг основных осей на углы поворота по дифференту $\Delta\gamma$, крену $\Delta\theta$ и курсу $\Delta\varphi$;

$\begin{pmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \\ \Delta Z_{12} \end{pmatrix}$ — вектор линейного смещения из первого положения во второе в системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$, связанной с первым положением сенсора;

$\begin{pmatrix} x_1(i, j) \\ y_1(i, j) \\ z_1(i, j) \end{pmatrix}$ — координаты i, j -го измерения из $\mathbf{D}_2$, преобразованные в систему координат $O_1X_1Y_1Z_1$ (вектор $\overline{O_1C_2}$ на рис. 1).

Зная вектор $\overline{O_1C_2}$, можно вычислить соответствующие ему углы сканирования по азимуту и возвышению в $\mathbf{D}_1$ (на рис. 1 оптическая ось сенсора совпадает с осью O_1Y_1 , являющейся центром телесного угла обзора):

$$\alpha_1(i, j) = \begin{cases} \arctg\left(\frac{Y_1(i, j)}{X_1(i, j)}\right), & \text{если } X_1(i, j) \geq 0; \\ \pi + \arctg\left(\frac{Y_1(i, j)}{X_1(i, j)}\right), & \text{если } X_1(i, j) < 0; \end{cases}$$

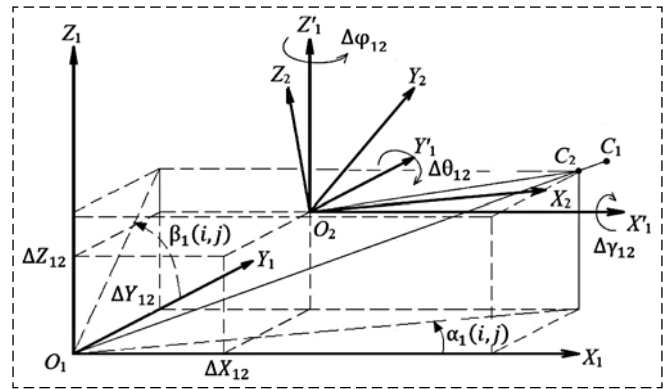


Рис. 1. Алгоритм вычисления функционала разности двух 3D-изображений

Fig. 1. Algorithm for calculating the difference functional of two 3D images

$$\beta_1(i, j) = \arctg\left(\frac{Z_1(i, j)}{\sqrt{X_1^2(i, j) + Y_1^2(i, j)}}\right).$$

Если $\alpha_1(i, j)$ и $\beta_1(i, j)$ принадлежат сектору обзора сенсора, то для данных углов сканирования (с учетом дискретности сканирования) существует соответствующее измерение $d_1(\alpha_1(i, j), \beta_1(i, j))$ в $\mathbf{D}_1$ (на рис. 1 — вектор $\overline{O_1C_1}$). Модуль разницы длины вектора $\overline{O_1C_2}$ и соответствующего ему по направлению измерения из $\mathbf{D}_1$

$$\Delta d_{ij} = |\sqrt{X_1^2(i, j) + Y_1^2(i, j) + Z_1^2(i, j)} - d_1(\alpha_1(i, j), \beta_1(i, j))|$$

назовем i, j -й элементарной разностью двух дальнометрических изображений $\mathbf{D}_1$ и $\mathbf{D}_2$ для данного значения вектора перемещения-поворота Δ_2 . Тогда значение функционала при данном значении вектора перемещения-поворота Δ_2 будет равно усредненной сумме всех элементарных разностей, а формула вычисления функционала будет иметь следующий вид:

$$\Delta D_{12}(\Delta_{1,2}) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta d_{i,j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{i,j}},$$

где $c_{i,j} \in \{0, 1\}$ ($c_{i,j} = 1$, если для i, j -го измерения из $\mathbf{D}_2$ существует соответствующее измерение $d_1(\alpha_1(i, j), \beta_2(i, j))$ из $\mathbf{D}_1$ и $c_{i,j} = 0$ — в противном случае).

Так как сумма $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{i,j}$ равна числу измерений из $\mathbf{D}_2$, которые пересекаются с измерениями из $\mathbf{D}_1$ при данном Δ_2 , то функционал $\Delta D_{12}(\Delta_{1,2})$ является средним значением элементарных раз-

ностей двух дальнометрических изображений D_1 и D_2 на множестве всех возможных значений вектора $\Delta_{1,2}$. Очевидно, что глобальный минимум такого функционала находится в точке решения, и рассматриваемая навигационная задача сведена к задаче оптимизации [21].

Для выбора метода решения и определения условий, при которых данная задача может быть решена в реальном времени, исследуем форму функционала в области решения для сред с различной геометрией.

Исследование формы функционала разности 3D-дальнометрических изображений

Для проведения экспериментальных исследований разработаны и созданы программно-аппаратные средства, состоящие из 3D-лазерного сенсора, сопряженного с компьютером с соответствующим прикладным программным обеспечением. В качестве 3D-лазерного сенсора были использованы 2D-лазерный сенсор Нокую UTM-30LX на опорно-поворотном устройстве и камера глубины Asus Xtion PRO [22].

Исследования проводили в различных средах: в помещениях, где преобладает линейная геометрия, в городской среде, объединяющей объекты с линейной и нелинейной геометрией (рис. 2, см. третью сторону обложки) и в естественной среде (пересеченная и лесистая местности), где преобладает нелинейная геометрия.

Для исследования формы функционала в области решения можно использовать функционал саморазличия (аналог автокорреляционной функции — дальнометрическое изображение сдвигается относительно самого себя). Одномерные сечения шестимерного функционала саморазличия для каждой переменной при фиксации в точке решения остальных пяти для приведенной выше сцены показаны на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Как видно из рис. 3, функционал разности дальнометрических изображений для типичного городского ландшафта имеет ярко выраженный минимум в точке решения, что гарантирует прямое решение задачи оптимизации при попадании в интервал унимодальности вокруг точки решения. Для других внешних сред (помещения, естественная среда) выводы аналогичны, хотя могут быть и исключения, например, когда среда представляет собой ровную плоскость (городскую площадь, дорогу) или несколько параллельных друг другу плоскостей (длинный коридор с ровными стенами). В этих случаях функционал имеет форму типа "овра-

га" равной глубины и не имеет единственного глобального минимума, однако любой из них однозначно определяет часть искомых координат, а остальные связаны линейной зависимостью [13–16] (например, для горизонтальной площадки однозначно определяются высота, крен и дифферент, а в длинном коридоре однозначно определяются все координаты, кроме горизонтальных ΔX_{12} и ΔY_{12} , значения которых связаны линейной зависимостью).

Для исследуемой сцены интервалы унимодальности (на рис. 3, см. третью сторону обложки, показаны интервалы унимодальности $I_{\Delta Z}$ и $I_{\Delta Y}$ для переменных ΔZ и ΔY) будут следующие:

$$\begin{aligned} -0,6 < \Delta X < 0,6 \text{ м}; & -0,6 < \Delta Y < 0,6 \text{ м}; \\ -0,35 < \Delta Z < 0,35 \text{ м}; & -25^\circ < \Delta \gamma < 25^\circ; \\ -30^\circ < \Delta \theta < 30^\circ; & -30^\circ < \Delta \varphi < 30^\circ. \end{aligned}$$

В отличие от одномерных сечений построение двумерных сечений функционала в точке решения для двух переменных при фиксации остальных четырех позволяет более полно исследовать функционал (рис. 4, см. третью сторону обложки).

На рис. 4, а приведено двумерное сечение (варьируются координаты ΔZ_{12} и ΔX_{12}) функционала в точке решения при смещении сенсора во второе положение по координате ΔZ_{12} (по высоте на 20 см), а на рис. 4, б — двумерное сечение (варьируются координаты ΔY_{12} и $\Delta \theta_{12}$) функционала в точке решения при смещении сенсора во второе положение по координате ΔY_{12} (по дифференту на -10°) для приведенной на рис. 2 (см. третью сторону обложки) сцены.

Реализация метода экстремальной навигации по 3D-дальнометрическим изображениям

Знание интервалов унимодальности по каждой координате для данной среды и скоростей (линейных и угловых) объекта управления позволяет выбрать такую частоту съема 3D-изображений, чтобы перемещение по каждой координате между двумя соседними съемами не превышало половину интервала унимодальности (при невозможности достижения такой частоты съема изображений необходимо снижать скорости движения). Соблюдение данного условия гарантирует возможность прямого поиска глобального минимума функционала из начала координат области его определения (нулевое смещение по всем шести координатам).

Таблица 1
Table 1

Результаты вычислений
Calculation results

Координата	ΔX_{12} , см	ΔY_{12} , см	ΔZ_{12} , см	$\Delta \gamma_{12}$, °	$\Delta \theta_{12}$, °	$\Delta \varphi_{12}$, °
Выполненное смещение	–33	4	–2	0	0	–19
Вычисленное смещение	–32,29	3,55	–1,94	–0,28	0,12	–19,51
Ошибка	0,71	–0,45	0,06	–0,28	0,12	–0,51

Для прямого поиска глобального минимума функционала $\Delta D_{12}(\Delta_{1,2})$ использовались градиентные методы и метод покоординатного спуска с выбором интервалов поиска пропорцией золотого сечения, которые позволили для используемых сенсоров решать задачу в реальном времени на доступных бортовых вычислителях. Результат работы в реальной среде созданных алгоритмических и программно-аппаратных средств приведен в табл. 1. Время вычислений на компьютере с процессором Intel Core i7-9700K составило 0,21 с.

На рис. 5 (см. четвертую сторону обложки) в системе координат, связанной с первым положением сенсора, приведены объединенное облако точек обоих изображений и положения сенсора в моменты съема изображений. Другими словами, это и есть результат решения так называемой SLAM-задачи.

Одномерные сечения функционала $\Delta D_{12}(\Delta_{1,2})$ в точке решения для рассматриваемого примера приведены на рис. 6 (см. четвертую сторону обложки). Как видно из данного рисунка, начало поиска из точки, соответствующей нулевому вектору приращений координат (пересечение осью $0\Delta D_{12}$ одномерных сечений функционала), гарантирует прямой спуск в глобальный минимум по всем координатам.

Способы уменьшения ошибки
при экстремальной навигации

Хотя ошибка вычислений по каждой координате является знакопеременной, суммарная ошибка растет с ростом циклов навигации. Сбрасывание суммарной ошибки обеспечивает использование метода опорных изображений, предложенного в работах [5, 6, 8], который применим только для заранее исследованных сред, когда имеется банк изображений внешней среды с известными координатами точек их съема. Для неизвестных заранее сред снижение суммарной ошибки может дать модификация данного метода, если в качестве опорного брать более "старое" изображение, имеющее с текущим изображением непустое пересечение зон обзора. Смещение между положениями сенсора при формировании опорного и текущего изображений может быть значительно больше интервала унимодальности, но выполненное сначала вычисление координат по последовательности соседних изображений гарантирует попадание в интервал унимодальности вокруг точки глобального минимума функционала разности опорного и текущего изображений и обеспечивает тем самым прямое нахождение глобального минимума. Выполнение описанной процедуры позволяет обнулить суммарную ошибку, которая пропорциональна числу снятых изображений между опорным и текущим изображениями, и заменить ее на ошибку одного цикла навигации по опорному и текущему изображениям. Критерием выбора более "старого" изображения в качестве опорного является достаточная площадь пересечения зон обзора (число общих точек двух анализируемых изображений) и значение глобального минимума функционала различия изображений, которое растет с уменьшением площади пересечения

Таблица 2
Table 2

Результаты вычислений
Calculation results

Смещение	Координата (ошибка)					
	$\Delta X_{12} (\delta_x)$, см	$\Delta Y_{12} (\delta_y)$, см	$\Delta Z_{12} (\delta_z)$, см	$\Delta \gamma_{12} (\delta_\gamma)$, °	$\Delta \theta_{12} (\delta_\theta)$, °	$\Delta \varphi_{12} (\delta_\varphi)$, °
Выполненное смещение в пятое положение	–85,15	53,43	4	0	0	–60
Вычисленное по пяти изображениям смещение в пятое положение	–87,24 (–2,09)	52,08 (–1,35)	1,43 (–2,57)	–0,40 (–0,40)	0,51 (0,51)	–60,99 (–0,99)
Уточненное по первому изображению смещение в пятое положение	–86,08 (–0,93)	53,64 (0,21)	4,14 (0,14)	–0,18 (–0,18)	0,25 (0,25)	–59,34 (0,66)

изображений и косвенно характеризует ошибку данного цикла экстремальной навигации.

На рис. 7 (см. четвертую сторону обложки) и в табл. 2 приведен результат решения SLAM-задачи при снятии и обработке в процессе движения последовательности пяти 3D-изображений.

В первой строке табл. 2 приведен вектор выполненного смещения из первого положения в пятое, во второй строке — результаты четырех циклов обработки пяти изображений (1-2, 2-3, 3-4, 4-5) при вычислении координат в пятом положении, в третьей строке — результаты уточнения координат пятого положения при использовании первого изображения в качестве опорного. Сравнение ошибок решения задачи навигации во второй и третьей строках подтверждает эффективность использования предложенной модификации метода опорных изображений.

Заключение

Предложенный вариант экстремальной навигации обеспечивает решение полной навигационной задачи по данным современных 3D-сенсоров в реальном времени. Использование модификации метода опорных изображений позволяет снизить суммарную ошибку навигации, растущую пропорционально числу циклов решения задачи навигации, до значений, обеспечивающих автономное функционирование транспортных роботов и БПЛА в заранее не подготовленных и неизвестных средах. Эффективность предложенных алгоритмических и разработанных программно-аппаратных средств экстремальной навигации подтверждается результатами натурных экспериментов, проведенными в реальных условиях различных сред.

Список литературы

1. Каляев А. В., Носков В. П., Чернухин Ю. В., Каляев И. А. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. М.: Наука, 1990. 147 с.
2. Besl P. J., McKay Neil D. A Method for Registration of 3-D Shapes // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1992. Vol. 14, N. 2. P. 239—256.
3. Zhang Zhengyou. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces // International Journal of Computer Vision. 1994. Vol. 13, N. 12. P. 119—152.
4. Носков В. П., Носков А. В. Система экстремальной навигации цехового транспортного робота // Сб. научн. тр. Искусственный интеллект в технических системах. М.: Гос. ИФТП. 1998. С. 136—144.
5. Лакота Н. А., Носков В. П., Рубцов И. В., Лундgren Я.-О. Моор Ф. Опыт использования элементов ис-

кусственного интеллекта в системе управления цехового транспортного робота // Мехатроника. 2000. № 4. С. 44—47.

6. Носков А. В., Носков В. П. Распознавание ориентиров в дальнометрических изображениях // Мобильные роботы и мехатронные системы. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 179—192.

7. Mitra N., Gelfand N., Pottmann H., Guibas L. J. Registration of Point Cloud Data from a Geometric Optimization Perspective // Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing. 2004. P. 22—31.

8. Носков В. П., Носков А. В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 12. С. 16—21.

9. Носков В. П., Рубцов И. В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 12. С. 21—24.

10. Носков В. П., Носков А. В. Светолокационная СТЗ в системе навигации автономных мобильных робототехнических комплексов // Известия ТРТУ. 2006. № 3. С. 184—185.

11. Носков А. В., Рубцов И. В., Романов А. Ю. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 8. С. 2—5.

12. Nüchter A., Lingemann K., Hertzberg J., Surmann H. 6D SLAM — 3D Mapping Outdoor Environments // Journal of Field Robotics. September 2007. Vol. 24, N. 8—9. P. 699—722.

13. Segal A., Haehnel D., Thrun S. Generalized-ICP // Proc. of Robotics: Science and Systems. RSS. 2009.

14. Pomerleau F., Colas F., Siegwart R., Magnenat S. Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets // Autonomous Robots. April 2013. Vol. 34, N. 3. P. 133—14.

15. Bylow E., Sturm J., Kerl C., Kahl F., Cremers D. Real-Time Camera Tracking and 3D Reconstruction Using Signed Distance Functions // Proceedings of "Robotics: Science and Systems". Berlin, Germany. 2013. Vol. 9.

16. Загоруйко С. Н., Казьмин В. Н., Носков В. П. Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 8. С. 62—68.

17. Казьмин В. Н., Носков В. П. Выделение геометрических и семантических объектов в дальнометрических изображениях для навигации роботов и реконструкции внешней среды // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 10 (171). С. 71—83.

18. Носков В. П., Киселев И. О. Трехмерный вариант метода Хафа в реконструкции внешней среды и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. № 8. 2018. С. 552—560.

19. Носков В. П., Киселев И. О. Выделение плоских объектов в линейно структурированных 3D-изображениях // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 2(19). С. 31—38.

20. Носков В. П., Киселев И. О. Использование текстуры линейных объектов для построения модели внешней среды и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 8. С. 490—497.

21. Захарова Е. М., Минашина И. К. Обзор методов многомерной оптимизации // Информационные процессы. 2014. Т. 14, № 3. С. 259—261.

22. URL: https://www.asus.com/ru/3D-sensor/Xtion_PRO_LIVE/specifications/

Extreme 3D Image Navigation in Mobile Robotics

V. P. Noskov, noskov_mstu@mail.ru, D. V. Gubernatorov, gubernatorovdanil@gmail.com,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Noskov Vladimir P., PhD. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005,
Russian Federation, e-mail: noskov_mstu@mail.ru

Accepted on July 27, 2021

Abstract

The actual problem of determining all six coordinates of the current position of a mobile robot (unmanned aerial vehicle) from 3D-range-finding images (point clouds) generated by an onboard 3D laser sensor when moving (flying) in an unknown environment is considered. An extreme navigation algorithm based on using multidimensional optimization methods is proposed. The rules for calculating the difference between 3D images of the external environment used for optimization of the functional are described. The form of the functional of the difference of 3D images for different environments (premises, industrial-urban environment, rugged and wooded areas) has been investigated. Requirements for the characteristics of the sensor and the geometry of the external environment are formulated, the fulfillment of which ensures the correct formulation and solution of the problem of extreme navigation. The optimal methods of scanning the surrounding space are described and the conditions are substantiated, the fulfillment of which ensures the solution of the navigation problem by the proposed algorithm in real time (at the rate of movement) when processing 3D images formed by modern 3D laser sensors. In particular, the dependence between the frequency of formation of 3D images and the angular and linear velocities of motion is described, which ensures that the functional of the difference of 3D images falls into the multidimensional interval of unimodality, which guarantees a direct search of global minimum in real time. Various methods of direct search for the global minimum of the functional are tested and the fastest for the case under consideration are selected. The accuracy of solving the navigation problem is estimated and a method is proposed to reduce the accumulated error, based on using an older 3D image for correcting the calculated value of the current coordinates, which has an intersection of the view area with the current view area. The proposed method, which is a modification of the reference image method, allows reduce the total error, which grows in proportion to the number of cycles of solving the extreme navigation problem, to values that ensure the autonomous functioning of transport robots and UAVs in previously unprepared and unknown environments. The effectiveness of the proposed algorithmic and developed software and hardware for extreme navigation is confirmed by field experiments carried out in real conditions of various environments.

Keywords: laser sensor, 3D range-finding images, extreme navigation, multidimensional optimization problem

For citation:

Noskov V. P., Gubernatorov D. V. Extreme 3D Image Navigation in Mobile Robotics, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 11, pp. 594–600.

DOI: 10.17587/mau.22.594-600

References

1. Kalyaev A. V., Noskov V. P., Chernuhin Yu. V., Kalyaev I. A. Homogeneous control structures of adaptive robots, Moscow, Nauka, 1990, p. 147 (in Russian).
2. Besl P. J., McKay Neil D. A Method for Registration of 3-D Shapes, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 1992, vol. 14, no. 2, pp.239–256.
3. Zhang Zhengyou. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces, *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13 (12), pp.119–152.
4. Noskov V. P., Noskov A. V. Extreme navigation system of a workshop transport robot, *Sb. nauchn. tr. Iskusstvennyy intellekt v tekhnicheskikh sistemah*, 1998, pp. 136–144 (in Russian).
5. Lakota N. A., Noskov V. P., Rubtsov I. V., Lundgren Ya.-O., Moor F. Experience of using elements of artificial intelligence in the control system of a workshop transport robot, *Mekhatronika*, 2000, no. 4, pp. 44–47 (in Russian).
6. Noskov A. V., Noskov V. P. Recognition of landmarks in ranging images, *Mobil'nye roboty i mekhatronnye sistemy*, Moscow, Publishing house of MGU, 2001, pp. 179–192 (in Russian).
7. Mitra N., Gelfand N., Pottmann H., Guibas L. J. Registration of Point Cloud Data from a Geometric Optimization Perspective, *Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, 2004, pp. 22–31.
8. Noskov V. P., Noskov A. V. Navigation of mobile robots by ranging images, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2005, no. 12, pp. 16–21 (in Russian).
9. Noskov V. P., Rubtsov I. V. Experience in solving the problem of autonomous motion control of mobile robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, no. 12, pp. 21–24 (in Russian).
10. Noskov V. P., Noskov A. V. Light-locating STV in the navigation system of autonomous mobile robotic systems, *Izvestiya TRTU*, 2006, no. 3, pp. 184–185 (in Russian).
11. Noskov A. V., Rubtsov I. V., Romanov A. Yu. Environment fusion model on basis of data from videocamera and range scanner, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2007, no. 8, pp. 2–5 (in Russian).
12. Nüchter A., Lingemann K., Hertzberg J., Surmann H. 6D SLAM — 3D Mapping Outdoor Environments, *Journal of Field Robotics*, September 2007, vol. 24, no. 8–9, pp. 699–722.
13. Segal A., Haehnel D., Thrun S. Generalized-ICP, *Proc. of Robotics: Science and Systems*, RSS, 2009.
14. Pomerleau F., Colas F., Siegwart R., Magnenat S. Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets, *Autonomous Robots*, April 2013, vol. 34, no. 3, pp. 133–14.
15. Bylow E., Sturm J., Kahl F., Cremers D. Real-Time Camera Tracking and 3D Reconstruction Using Signed Distance Functions, *Proceedings of "Robotics: Science and Systems"*, Berlin, Germany, 2013, vol. 9.
16. Zagoruyko S. N., Kaz'min V. N., Noskov V. P. UAV navigation and 3D-reconstruction of the external environment according to the onboard STV, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2014, no. 8, pp. 62–68 (in Russian).
17. Kaz'min V. N., Noskov V. P. Detecting geometric and semantic objects in range image for robot navigation and environment reconstruction, *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 10 (171), pp. 71–83 (in Russian).
18. Noskov V. P., Kiselev I. O. A Three-Dimensional Version of the Hough Method in the Reconstruction of the External Environment and Navigation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 8, pp. 552–560 (in Russian).
19. Noskov V. P., Kiselev I. O. Selection of plane objects in linear-structured 3d-images, *Robototekhnika i Tekhnicheskaya Kibernetika*, 2018, no. 2(19), pp. 31–38 (in Russian).
20. Noskov V. P., Kiselev I. O. Using Texture of Linear Objects for Build Environments Model and Navigations, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 8, pp. 490–497 (in Russian).
21. Zaharova E. M., Minashina I. K. Review of multidimensional optimization techniques, *Informacionnye Processy*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 259–261 (in Russian).
22. Available at: https://www.asus.com/ru/3D-sensor/Xtion_PRO_LIVE/specifications/