

В. П. Носков, канд. тех. наук, зав. сектором, доц., noskov_mstu@mail.ru,
И. О. Киселев, аспирант, kiselev201@rambler.ru,
МГТУ им Н. Э. Баумана, г. Москва

Использование текстуры линейных объектов для построения модели внешней среды и навигации¹

Рассмотрены актуальные задачи 3D-реконструкции модели индустриально-городской среды и навигации, решаемые путем выделения и идентификации в процессе движения текстурированных линейных объектов по данным бортовой комплексированной системы технического зрения, состоящей из взаимно-юстированных 3D-лазерного сенсора и видеокамеры с общей зоной обзора. Для полного решения навигационной задачи (определения трех линейных и трех угловых координат объекта управления) необходимо в процессе движения в последовательности облаков точек, формируемых 3D-лазерным сенсором, выделять и идентифицировать не менее трех взаимно не параллельных плоских объектов. В случае выделения менее трех плоских объектов (например, в средах, подвергшихся разрушениям) навигационная задача решается не полностью (определяются однозначно не все координаты, а некоторые координаты связываются линейной или нелинейной зависимостями). В этих случаях предлагается дополнительно использовать формируемую видеокамерой текстуру выделяемых плоских объектов. В статье приведен анализ особенностей решения навигационной задачи в зависимости от числа выделяемых и идентифицируемых текстурированных линейных объектов в текущих комплексированных дальнометрических изображениях. Предложены алгоритмы решения навигационной задачи при выделении и идентификации в процессе движения одного текстурированного линейного объекта и двух текстурированных не параллельных друг другу линейных объектов. Показано, что в первом случае использование текстуры позволяет свести решение навигационной задачи к трехмерной, а во втором случае — к одномерной задаче оптимизации (поиску глобального оптимума функционала соответственно от трех и одной переменной). Предложенные алгоритмы обработки комплексированных изображений обеспечивают полное решение навигационной задачи даже при выделении менее трех линейных объектов, что существенно повышает достоверность решения навигационной задачи и построения модели внешней среды даже в индустриально-городских средах, подвергшихся разрушению, и, следовательно, надежность функционирования и живучесть наземных и воздушных робототехнических средств в автономных режимах движения. Приведены результаты работы соответствующих программно-аппаратных средств в реальных индустриально-городских средах, подтверждающие корректность и эффективность предлагаемых алгоритмов.

Ключевые слова: комплексированная система технического зрения, текстурированные линейные объекты, семантическая модель индустриально-городской среды, навигация

Введение

Анализ областей и интенсивности использования робототехнических средств показывает, что в настоящее время все более и более востребованными становятся наземные робототехнические комплексы (РТК) и беспилотные летательные аппараты (БЛА), ориентированные на функционирование в индустриально-городских средах [1]. Данные среды характеризуются наличием экранированных зон, что значительно ограничивает использование традиционных средств дистанционного управления и навигационного обеспечения. Перспективными здесь будут робототехнические средства с повышенной автономностью, способные функционировать какое-то время без участия оператора при отсутствии искусственных (спутниковая навигация) и естественных (магнитное поле Земли) навигационных полей. При создании таких

автономных систем решается так называемая SLAM-задача — построение модели внешней среды и навигация [2, 3]. Формирование модели и определение текущих координат на бортовых вычислителях по данным бортовых систем технического зрения (СТЗ) в темпе движения объекта управления обеспечивает планирование и отработку целенаправленных безопасных траекторий движения без участия оператора, что и является основой автономного функционирования [4–6]. В качестве бортовых СТЗ для автономных систем наиболее популярны и предпочтительны 2D- и 3D-лазерные сенсоры [4–8], которые позволяют сразу получать в зоне обзора геометрию внешней среды в виде облака точек. Использование непосредственно формируемых 3D-лазерными сенсорами исходных облаков точек, как правило, большого объема [9, 10], не всегда возможно, особенно для бортовых систем управления. Поэтому перспективным здесь является сжатие исходных дальнометрических данных без потери геометрической и навигационной информации

¹Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-04178 офи_м.

путем перехода к семантическому описанию внешней среды в виде совокупности линейных объектов (плоскостей, линий, углов), из которых и состоят в основном индустриально-городские среды (дороги, тротуары, ограждения, стены, перекрытия, ступени и другие фрагменты индустриально-городской инфраструктуры, зданий и помещений) [7, 11–13]. Как известно [11], для решения полной навигационной задачи (определение трех линейных и трех угловых координат объекта управления) необходимо в процессе движения в последовательности дальнометрических изображений выделять и идентифицировать не менее трех взаимно не параллельных плоских объектов. Однако возможны случаи, когда выделяются и идентифицируются менее трех плоских объектов: два или даже один. Такое возможно, когда в поле зрения попадают только два плоских объекта, например, стена и тротуар, или один, например, дорога. В этих случаях навигационная задача решается не полностью (определяются неоднозначно не все координаты, а некоторые координаты связываются линейной или нелинейной зависимостями). Для полного решения навигационной задачи в этих случаях в данной работе предлагается использовать текстуру выделяемых плоских объектов. Текстура может быть получена путем комплексирования дальнометрических и видеоизображений, формируемых комплексированной СТЗ, состоящей из взаимно юстированных 3D-лазерного сенсора и видеокамеры с общей зоной обзора [14].

Навигационная задача при выделении и идентификации одного плоского текстурированного объекта

Пусть есть два дальнометрических изображения внешней среды, полученные из двух разных положений $OXYZ$ и $oxuz$, в которых выделены соответственно плоскости (рис. 1):

$$P_1: X \cos \alpha_{11} + Y \cos \beta_{11} + Z \cos \gamma_{11} = \rho_{11};$$

$$p_1: x \cos \alpha_{21} + y \cos \beta_{21} + z \cos \gamma_{21} = \rho_{21}.$$

Пусть также известно, что плоскости P_1 и p_1 принадлежат одному и тому же плоскому объекту внешней среды и имеют непустое пересечение в части этого плоского объекта, видимой из обоих положений. Требуется определить вектор перемещения $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta \varphi, \Delta \psi, \Delta \theta)$ сен-

сора из положения $OXYZ$ в положение $oxuz$ при известной текстуре выделенного плоского объекта.

Так как плоскости P_1 и p_1 принадлежат одному и тому же плоскому объекту внешней среды, то нормали N_{11} и N_{21} к этим плоскостям параллельны и совпадают по направлению, поэтому для соответствующих единичных векторов можно записать следующее векторное уравнение относительно искомых угловых перемещений $(\Delta \varphi, \Delta \psi, \Delta \theta)$:

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha_{11} \\ \cos \beta_{11} \\ \cos \gamma_{11} \end{bmatrix} = \mathbf{A}(\Delta \varphi, \Delta \psi, \Delta \theta) \begin{bmatrix} \cos \alpha_{21} \\ \cos \beta_{21} \\ \cos \gamma_{21} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\mathbf{A}(\Delta \varphi, \Delta \psi, \Delta \theta)$ — обобщенная матрица поворотов при переходе из системы $oxuz$ в систему $OXYZ$.

Для обобщенной матрицы поворотов примем следующую последовательность поворотов:

$$\mathbf{A}(\Delta \varphi, \Delta \psi, \Delta \theta) = \mathbf{A}_Z(\Delta \varphi) \mathbf{A}_X(\Delta \psi) \mathbf{A}_Y(\Delta \theta),$$

где $\mathbf{A}_E(F)$ — матрица поворота вокруг оси E на угол F .

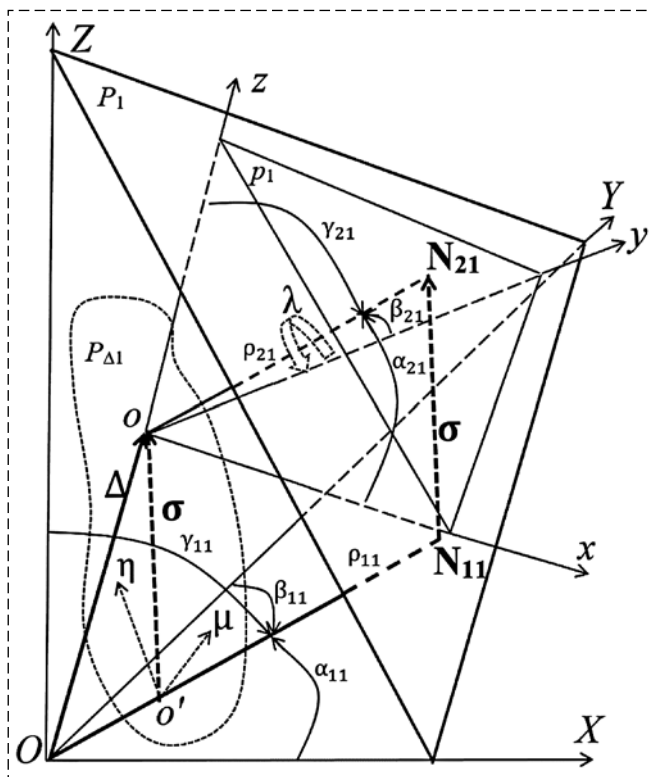


Рис. 1. Один и тот же плоский объект, выделенный в двух дальнометрических изображениях, полученных из двух разных положений

Fig. 1. The same flat object, which selected in two 3D images obtained from two different positions

Векторное уравнение (1) представляет собой систему из трех нелинейных тригонометрических уравнений, которые связывают искомые угловые перемещения $(\Delta\varphi, \Delta\psi, \Delta\theta)$ соответствующей зависимостью. Вектор угловых перемещений однозначно определяется значением угла вращения λ системы координат $oxyz$ вокруг вектора N_{21} (рис. 1). Вращение системы координат $oxyz$ вокруг вектора N_{21} на угол λ эквивалентно вращению плоскости p_1 в плоскости P_1 на тот же угол λ .

В свою очередь, вследствие того, что сенсор во втором положении (центр системы координат $oxyz$ — точка o) может находиться только в плоскости $P_{\Delta 1}$ (рис. 1), параллельной плоскости P_1 и находящейся на расстоянии $\rho_{11} - \rho_{21}$ от центра системы координат $OXYZ$ (точка O), для вектора линейных перемещений $\Delta = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ можно записать:

$$\Delta X \cos \alpha_{11} + \Delta Y \cos \beta_{11} + \Delta Z \cos \gamma_{11} = \rho_{11} - \rho_{21}. \quad (2)$$

Множество возможных линейных перемещений ограничено точками, принадлежащими плоскости (2), и если мы определим начало координат $oxyz$ (точка o на рис. 1) как вектор (μ, η) в двумерной системе координат $o'\mu\eta$, связанной с данной плоскостью (рис. 1), то мы определим и искомые линейные координаты $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ в системе $OXYZ$. Перемещение системы координат $oxyz$ на вектор (μ, η) в плоскости $P_{\Delta 1}$ эквивалентно перемещению плоскости p_1 в плоскости P_1 на этот же вектор (μ, η) .

Таким образом, при выделении и идентификации в процессе движения в двух последовательных дальнометрических изображениях од-

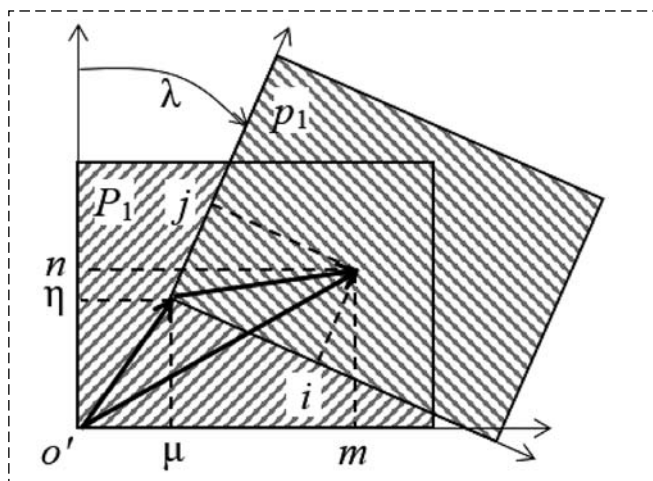


Рис. 2. Совмещение плоскостей P_1 и p_1 при параметрах μ, η и λ
Fig. 2. The combination of the planes P_1 and p_1 with the parameters μ, η and λ

ного плоского объекта искомое перемещение $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta\varphi, \Delta\psi, \Delta\theta)$ однозначно задается углом вращения λ и вектором перемещения (μ, η) плоскости p_1 в плоскости P_1 , которые можно определить путем совмещения их текстур. При этом значения параметров μ, η и λ , при которых текстуры максимально совпадают, и дают искомое перемещение. На трехмерной области значений этих параметров можно определить функционал разности текстур текстурированных плоскостей P_1 и p_1 и свести задачу поиска перемещения $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta\varphi, \Delta\psi, \Delta\theta)$ к трехмерной задаче оптимизации. На рис. 2 приведено совмещение плоскостей P_1 и p_1 при параметрах μ, η и λ .

Как видно из рис. 2, пикселу с индексами (i, j) из p_1 соответствует пиксел с индексами (m, n) из P_1 , которые определяются следующим векторным уравнением:

$$\begin{bmatrix} mv \\ nv \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu \\ \eta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda \\ -\sin \lambda & \cos \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} iv \\ jv \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где v — линейный размер пиксела.

Тогда функционал разности текстур плоскостей P_1 и p_1 при параметрах μ, η и λ можно определить как усредненную суммарную разность значений яркостей соответствующих им пикселов из зоны пересечения:

$$\Delta E(\mu, \eta, \lambda) = \frac{\sum_i \sum_j |e_{ij} - E_{mn}| c_{ij}(\mu, \eta, \lambda)}{\sum_i \sum_j c_{ij}(\mu, \eta, \lambda)}, \quad (4)$$

где e_{ij} — яркость пиксела из текстуры плоскости p_1 ; E_{mn} — яркость пиксела из текстуры плоскости P_1 , индексы которого вычислены в соответствии с выражением (3);

$c_{ij}(\mu, \eta, \lambda) \in \{0, 1\}$ — бинарное число, принимающее значение 1, если для пиксела e_{ij} из текстуры плоскости p_1 существует пиксел E_{mn} из текстуры плоскости P_1 , и принимающее значение 0 в противном случае.

Глобальный минимум функционала (4) на пространстве возможных значений μ, η и λ может быть найден методами оптимизации.

Навигационная задача при выделении и идентификации двух плоских текстурированных объектов

Пусть есть два дальнометрических изображения внешней среды, полученные из двух разных положений $OXYZ$ и $oxyz$, в каждом из

которых выделено и идентифицировано по две соответствующих друг другу плоскости (рис. 3):

$$P_1: X \cos \alpha_{11} + Y \cos \beta_{11} + Z \cos \gamma_{11} = \rho_{11};$$

$$p_1: x \cos \alpha_{21} + y \cos \beta_{21} + z \cos \gamma_{21} = \rho_{21}$$

и

$$P_2: X \cos \alpha_{12} + Y \cos \beta_{12} + Z \cos \gamma_{12} = \rho_{12};$$

$$p_2: x \cos \alpha_{22} + y \cos \beta_{22} + z \cos \gamma_{22} = \rho_{22}.$$

Пусть также известно, что плоскости P_1 и p_1 принадлежат одному плоскому объекту, а плоскости P_2 и p_2 — другому плоскому объекту внешней среды, плоскости P_1 и P_2 (p_1 и p_2) не параллельны друг другу и имеют непустое пересечение в частях этих плоских объектов, видимых из обоих положений. Требуется определить перемещение $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta \phi, \Delta \psi, \Delta \theta)$ сенсора из положения $OXYZ$ в положение $oxyz$ при известной текстуре выделенных плоских объектов.

Очевидно, что для любой пары плоскостей P_1 и p_1 или P_2 и p_2 , задача сводится к варианту, рассмотренному выше. Однако использование обеих пар плоскостей существенно упрощает задачу.

Для плоскостей P_2 и p_2 , так же как и для плоскостей P_1 и p_1 , можно записать аналогичное (1) векторное уравнение:

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha_{12} \\ \cos \beta_{12} \\ \cos \gamma_{12} \end{bmatrix} = \mathbf{A}(\Delta \phi, \Delta \psi, \Delta \theta) \begin{bmatrix} \cos \alpha_{22} \\ \cos \beta_{22} \\ \cos \gamma_{22} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Векторные уравнения (1) и (5) представляют собой систему из шести нелинейных тригонометрических уравнений, которые связывают искомые угловые перемещения $(\Delta \phi, \Delta \psi, \Delta \theta)$ соответствующей зависимостью. Вектор $(\Delta \phi, \Delta \psi, \Delta \theta)$ однозначно определяется данной избыточной системой уравнений (шесть уравнений, три неизвестных) и может быть определен с помощью численных методов.

Для плоскостей P_2 и p_2 , так же как и для плоскостей P_1 и p_1 , можно записать аналогичное (2) уравнение:

$$\Delta X \cos \alpha_{12} + \Delta Y \cos \beta_{12} + \Delta Z \cos \gamma_{12} = \rho_{12} - \rho_{22}, \quad (6)$$

которое ограничивает возможные положения сенсора во втором положении соответствующей плоскостью $P_{\Delta 2}$ (на рис. 3 плоскости $P_{\Delta 1}$ и $P_{\Delta 2}$ не показаны). Совокупность линейных уравнений (2) и (6) этих плоскостей ограничивает возможные положения сенсора прямой

линией ab их пересечения (рис. 3), которая параллельна прямой AB пересечения выделенных и идентифицированных пар плоскостей. Если мы определим точку o в одномерной системе координат $o'\mu$, связанной с прямой линией ab (рис. 3), то мы определим и искомые линейные координаты $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ в системе $OXYZ$. Перемещение системы координат $oxyz$ по прямой ab эквивалентно перемещению плоскости p_1 в плоскости P_1 и плоскости p_2 в плоскости P_2 по прямой AB .

Таким образом, при выделении и идентификации в процессе движения в двух последовательных дальнометрических изображениях двух не параллельных друг другу плоских объектов искомое перемещение $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta \phi, \Delta \psi, \Delta \theta)$ однозначно задается параметром μ на линии пересечения плоскостей (2) и (6), который можно определить путем совмещения текстур выделенных и идентифицированных плоскостей. При этом значение параметра μ , при котором текстуры максимально совпадают, и дает искомое перемещение. На одномерной области значений параметра μ можно определить функционал разности

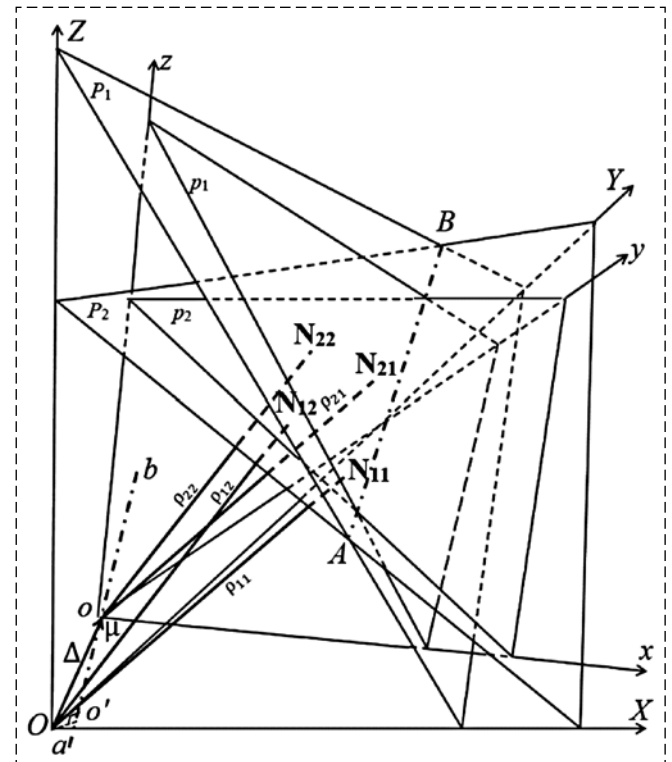


Рис. 3. Два одних и тех же плоских объекта, выделенных в двух дальнометрических изображениях, полученных из двух разных положений

Fig. 3. Two of the same flat objects selected in two ranging images obtained from two different positions

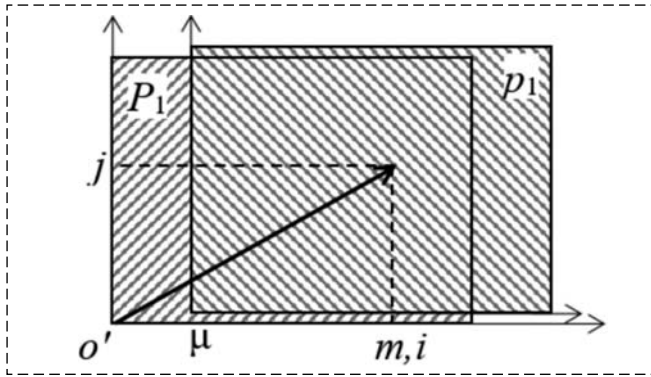


Рис. 4. Совмещение плоскостей P_1 и p_1 при параметре μ
Fig. 4. The combination of the planes P_1 and p_1 with the parameter μ

текстур текстурированных пар плоскостей P_1, p_1 и (или) P_2, p_2 и свести задачу поиска перемещения $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta \varphi, \Delta \psi, \Delta \theta)$ к одномерной задаче оптимизации. На рис. 4 приведено совмещение плоскостей P_1 и p_1 при параметре μ (аналогично можно совмещать и плоскости P_2 и p_2). При этом уравнение (3) примет вид

$$mv = \mu + iv,$$

а функционал (4) — вид

$$\Delta E(\mu) = \frac{\sum_i \sum_j |e_{ij} - E_{mj}| c_{ij}(\mu)}{\sum_i \sum_j c_{ij}(\mu)}. \quad (7)$$

При нахождении значения параметра μ , при котором функционал (7) принимает минимальное значение, вектор линейных перемещений определяется этим значением (μ является параметром при представлении прямой пересечения плоскостей P_1 и P_2 в параметрическом виде).

Поиск глобального минимума функционала (7) на множестве возможных значений параметра μ не представляет затруднений, так как может быть решен полным перебором в реальном времени.

Результаты экспериментальных исследований

Для экспериментальной проверки предлагаемых алгоритмов разработаны и созданы программно-аппаратные средства, состоящие из комплексированной СТЗ, сопряженной с компьютером с соответствующим прикладным программным обеспечением.

Для формального описания предлагаемого подхода удобно использовать аппарат кватернионов. Введем кватернион:

$$\mathbf{q}_1 = \left[\frac{\mathbf{R}_1}{|\mathbf{R}_1|} \sin\left(\frac{\omega_1}{2}\right), \cos\left(\frac{\omega_1}{2}\right) \right], \quad (8)$$

при котором вектор нормали $\mathbf{N}_{21}$ к плоскости p_1 (см. рис. 1) станет коллинеарным вектору нормали $\mathbf{N}_{11}$ к плоскости P_1 . Здесь $\mathbf{R}_1 = \mathbf{N}_{21} \times \mathbf{N}_{11}$ — вектор, вокруг которого выполняется поворот,

а $\omega_1 = \arccos\left(\frac{\mathbf{N}_{21} \mathbf{N}_{11}}{|\mathbf{N}_{21}| |\mathbf{N}_{11}|}\right)$ — угол поворота (на

рис. 5 (см. третью сторону обложки) в системе координат $OXYZ$, связанной с первым положением сенсора, приведены текстурированные плоские объекты P_1 и p_1 , вектор $\mathbf{R}_1$ и угол ω_1 для реальных комплексированных изображений). Соответствующее преобразование любой точки $\mathbf{V}_{21}$ плоскости p_1 (в том числе и вектора нормали $\mathbf{N}_{21}$) будет иметь вид

$$\mathbf{V}_{21}^* = \mathbf{q}_1 \mathbf{V}_{21} \mathbf{q}_1^{-1} \quad (\mathbf{N}_{21}^* = \mathbf{q}_1 \mathbf{N}_{21} \mathbf{q}_1^{-1}).$$

Для совмещения плоскостей P_1 и p_1 сдвинем плоскость p_1 вдоль вектора нормали $\mathbf{N}_{11}$ на расстояние $\Delta \rho = \rho_{11} - \rho_{21}$, тогда окончательное преобразование примет вид

$$\mathbf{N}_{21}^{**} = \mathbf{q}_1 \mathbf{N}_{21} \mathbf{q}_1^{-1} + (\rho_{11} - \rho_{21}) \begin{bmatrix} \cos \alpha_{11} \\ \cos \beta_{11} \\ \cos \gamma_{11} \end{bmatrix}.$$

После данного преобразования плоскость p_1 будет параллельна плоскости P_1 и совместится с ней (рис. 6, см. третью сторону обложки).

Для упрощения вычислений целесообразно совместить векторы нормалей к плоскостям с оптической осью сенсора $\mathbf{Y}$. В таком случае оси $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Z}$ можно принять за оси $o'\mu$ и $o'\eta$, а началом координат будет выступать точка O . Для этого вектор нормали $\mathbf{N}_{11}$ нужно повернуть вокруг вектора $\mathbf{R}_2 = \mathbf{N}_{11} \times \mathbf{Y}$ на угол

$\omega_2 = \arccos\left(\frac{\mathbf{N}_{11} \mathbf{Y}}{|\mathbf{N}_{11}| |\mathbf{Y}|}\right)$, соответствующий кватернион будет иметь вид

$$\mathbf{q}_2 = \left[\frac{\mathbf{R}_2}{|\mathbf{R}_2|} \sin\left(\frac{\omega_2}{2}\right), \cos\left(\frac{\omega_2}{2}\right) \right]. \quad (9)$$

После приведения текстур к одной плоскости выполняется совмещение текстур путем решения трехмерной задачи оптимизации, и находятся параметры μ_0, η_0 и λ_0 , при которых функционал (4) принимает минимальное значение. Поиск глобального минимума данного функционала не является тривиальной за-

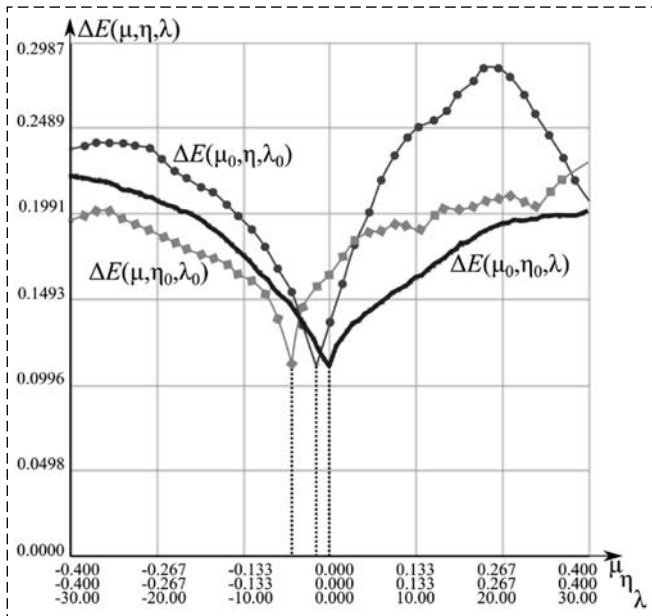


Рис. 7. Одномерные сечения функционала в точке решения
Fig. 7. One-dimensional sections of the functional at the solution point

дачей. Однако при небольших перемещениях $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta \phi, \Delta \psi, \Delta \theta)$ в соответствующей окрестности точки решения, к которой принадлежит и точка $\mu = \eta = \lambda = 0$, одномерные сечения функционала (4) являются унимодальными функциями (рис. 7), и решение может быть найдено известными методами оптимизации.

Найденные параметры μ_0 , η_0 и λ_0 однозначно определяют искомое перемещение. Вектор линейных перемещений определяется следующим выражением:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = (p_{11} - p_{21}) \begin{bmatrix} \cos \alpha_{11} \\ \cos \beta_{11} \\ \cos \gamma_{11} \end{bmatrix} + \mathbf{q}_2^{-1} \begin{bmatrix} \mu_0 \\ 0 \\ \eta_0 \end{bmatrix} \mathbf{q}_2, \quad (10)$$

где $\mathbf{q}_2$ — кватернион, определенный выражением (9).

Итоговые угловые перемещения можно представить как композицию кватернионов:

$$\mathbf{Q} = (Q_x, Q_y, Q_z, Q_w) = \mathbf{q}_3 \mathbf{q}_1,$$

где $\mathbf{q}_1$ — кватернион, определенный выражением (8);

$$\mathbf{q}_3 = \left[\frac{\mathbf{N}_{11}}{|\mathbf{N}_{11}|} \sin\left(\frac{\lambda_0}{2}\right), \cos\left(\frac{\lambda_0}{2}\right) \right] \text{ — кватернион}$$

поворота текстуры p_1 вокруг оси $\mathbf{N}_{11}$ на угол λ_0 .

Тогда вектор угловых перемещений в соответствии с принятой выше последовательно-

стью поворотов (1) определяется следующим выражением:

$$\begin{bmatrix} \Delta \phi \\ \Delta \theta \\ \Delta \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{arctg} \left(\frac{2Q_y Q_x - 2Q_y Q_z}{1 - 2Q_x^2 - 2Q_z^2} \right) \\ \operatorname{arctg} \left(\frac{2Q_x Q_w - 2Q_y Q_z}{1 - 2Q_x^2 - 2Q_z^2} \right) \\ \operatorname{arcsin} (2Q_x Q_y - 2Q_z Q_w) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Вычисленное в соответствии с выражениями (10) и (11) искомое перемещение $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta \phi, \Delta \psi, \Delta \theta)$ позволяет построить объединенную модель внешней среды и перемещение сенсора (рис. 8, см. третью сторону обложки).

На рис. 9 (см. третью сторону обложки) приведен результат обработки серии из семи комплексированных изображений, полученных в процессе перемещения сенсора (робота) в реальной среде.

Заключение

При решении SLAM-задач немаловажное значение имеет фильтрация ошибок измерений сенсора, влияющих на точность формирования модели и определения координат. При фильтрации обычно применяются методы усреднения, например, как это сделано в достаточно эффективном алгоритме, использующем знаковую функцию расстояний (SDF) при формировании модели внешней среды в дискретном трехмерном пространстве [15]. В данном алгоритме усреднение выполняется в каждом дискретном элементе трехмерной модели, попадающем на границу препятствия, оптимизация при решении навигационной задачи выполняется также с использованием всех этих дискретных элементов, которых достаточно много, что требует больших вычислительных ресурсов. В предлагаемом же алгоритме используются не отдельные точки исходного облака и даже не дискретные элементы трехмерного пространства с принадлежащими им точками, как в статье [15], а более интегральные элементы — плоские объекты, объединяющие большие по объему подмножества точек, которые усредняются аппроксимирующими их плоскостями [12, 13]. Таким образом, фильтрация выполняется на более высоком уровне, при этом формирование

модели внешней среды и оптимизация при решении навигационной задачи выполняются также с использованием выделенных плоских объектов, число которых несоизмеримо меньше числа исходных точек или дискретных элементов в алгоритме, использующем SDF. Кроме того, в процессе движения сенсора пока выделяются и используются одни и те же плоские объекты (например, протяженная стена, тротуар), практически не накапливаются и ошибки определения координат и формирования модели.

Работоспособность и эффективность предлагаемых алгоритмов видеонавигации, основанных на выделении и использовании линейных текстурированных объектов, проверена на реальных данных различных комплексированных СТЗ (камера глубины AsusXtionPro, 2D-сканер Нокую UTM-30LX на опорно-поворотном устройстве, комплексированный с цветной видеокамерой). Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют сделать заключение, что созданные алгоритмические и программно-аппаратные средства обеспечивают переход от больших объемов исходной зрительной информации к семантическим информационно-навигационным моделям, которые в явном и компактном виде содержат геометрические данные о внешней среде и навигационные данные об объекте управления. Предложенные алгоритмы обработки комплексированных (видеодалекометрических) изображений внешней среды обеспечивают полное решение навигационной задачи даже при выделении менее трех линейных объектов, что существенно повышает достоверность решения навигационной задачи даже в индустриально-городских средах, подвергшихся разрушению, что, в свою очередь, повышает надежность функционирования и живучесть РТК и БЛА в автономных режимах движения.

1. Лапшов В. С., Носков В. П. и др. Бой в городе. Боевые и обеспечивающие роботы в условиях урбанизированной территории // Известия ЮФУ. Технические науки № 3, 2011. С. 142—146.
2. Smith R., Self M., Cheeseman P. Estimating uncertain spatial relationships in robotics // Autonomous robot vehicles. — Springer, New York, NY, 1990. С. 167—193.
3. Leonard J. J., Durrant-Whyte H. F. Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot // Proceedings IROS'91: IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems' 91. — IEEE, 1991. — С. 1442—1447.
4. Каляев А. В., Носков В. П., Чернухин Ю. В., Каляев И. А. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. М.: Наука, 1990. 147 с.
5. Лакота Н. А., Носков В. П., Рубцов И. В., Лундгрэн Я.-О., Моор Ф. Опыт использования элементов искусственного интеллекта в системе управления цехового транспортного робота // Мехатроника. 2000. № 4. С. 44—47.
6. Носков В. П., Рубцов И. В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 12. С. 21—24.5.
7. Носков В. П., Носков А. В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 12. С. 16—21.
8. 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.
9. Haehnel A. S. D., Thrun S. Generalized ICP // Proc. of Robotics: Science and Systems (RSS). — 2009.
10. Mitra N. J. et al. Registration of point cloud data from a geometric optimization perspective // Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing. — ACM, 2004. С. 22—31.
11. 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) (Тематический сборник "Проблемы управления и робототехники"). С. 71—83.
12. Носков В. П., Киселев И. О. Трехмерный вариант метода Хафа в реконструкции внешней среды и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. № 8. С. 552—560.
13. Носков В. П., Киселев И. О. Выделение плоских объектов в линейно структурированных 3D-изображениях // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 2(19). С. 31—38.
14. Носков А. В., Рубцов И. В., Романов А. Ю. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальнометра // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 8. С. 2—5.
15. Bylow E., Sturm, Jürgen & Kerl, Christian & Kahl, Fredrik & Cremers, Daniel. Real-Time Camera Tracking and 3D Reconstruction Using Signed Distance Functions // Robotics: Science and Systems, 2013.

Using Texture of Linear Objects for Build Enviroments Model and Navigations

V. P. Noskov, noskov_mstu@mail.ru, I. O. Kiselev, kiselev201@rambler.ru,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Noskov Vladimir P., PhD, Special robotics and mechatronics department, NIISM Sector Head,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: noskov_mstu@mail.ru

Abstract

The actual tasks of 3D-reconstruction of the industrial-urban environment and navigation models are considered by solving the identification of textured linear objects in the process of movement according to the onboard complex and technical vision system consisting of a mutually adjusted 3D laser sensor and a video camera with a common viewing area. For a complete solution of the navigation task (determination of three linear and three angular coordinates of the control object), it is necessary to select and identify at least three mutually non-parallel flat objects in the process of moving in a sequence of point clouds formed by a 3D laser sensor. In the case of the allocation of less than three flat objects (for example, in environments subjected to destruction), the navigation problem is not fully solved (not all coordinates are determined unambiguously, and some coordinates are related by linear or non-linear dependencies). In these cases, it is proposed to additionally use the texture of the selected flat objects formed by the video camera. In the paper is given the analysis of the features of the solution of the navigation problem is carried out depending on the number of allocated and identifiable textured linear objects in the current integrated images and algorithms for solving the navigation problem are evaluated for selecting and identifying the process of movement of one textured linear object and of two textured non-parallel linear objects. It is shown that in the first case, the use of texture makes it possible to reduce the solution of the navigational problem to a three-dimensional one, and in the second case to a one-dimensional optimization problem (finding the global optimum of a functional three and one variable, respectively). The proposed algorithms for processing complexed images provide a complete solution to the navigation task even if less than three linear objects are selected, which significantly increases the reliability of solving the navigation task and building an environmental model even in industrial-urban environments that have been destroyed, and therefore, the reliability and survivability of the ground ones and airborne robotic tools in autonomous modes of movement. The results of the corresponding software and hardware solutions in real industrial-urban environments, confirmed the accuracy and effectiveness of the proposed algorithms.

Keywords: complex system technical vision system, textured linear objects, semantic model of industrial-urban environment, navigation

Acknowledgements: This work was supported by the RFBR grant № 16-29-04178 ofi_m

For citation:

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.

DOI: 10.17587/mau.20.490-497

References

1. Lapshov V. S., Noskov V. P. et al. *Boy v gorode. Boevye i obespechivayushchie roboty v usloviyah urbanizirovannoy territorii* (Fight in the city. Combat and support robots in urbanized conditions), *Izvestiya YuFU Tekhnicheskie nauki*, 2011, no. 3, pp. 142—146 (in Russian).
2. Smith R., Self M., Cheeseman P. Estimating uncertain spatial relationships in robotics, *Autonomous robot vehicles*, 1990, pp. 167—193.
3. Leonard J. J., Durrant-Whyte H. F. Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot, *Proceedings IROS'91: IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems' 91*, 1991, pp. 1442—1447.
4. Kalyaev A. V., Noskov V. P., Chernuhin Yu. V., Kalyaev I. A. *Odnorodnye upravlyayushchie struktury adaptivnykh robotov* (Homogeneous control structures of adaptive robots), Moscow, Nauka, 1990, p. 147 (in Russian).
5. Lakota N. A., Noskov V. P., Rubtsov I. V., Lundgren Ya.-O., Moor F. *Opyt ispol'zovaniya ehlementov iskusstvennogo intellekta v sisteme upravleniya cekhovogo transportnogo robota* (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 V. P., Rubtsov I. V. *Opyt resheniya zadachi avtonomnogo upravleniya dvizheniem mobil'nykh robotov* (Experience in solving the problem of autonomous motion control of mobile robots), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2005, no. 12, pp. 21—24 (in Russian).
7. Noskov V. P., Noskov A. V. *Navigatsiya mobil'nykh robotov po dal'nometricheskim izobrazheniyam* (Navigation of mobile robots by ranging images), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2005, no. 12, pp. 16—21 (in Russian).
8. Zagoruyko S. N., Kaz'min V. N., Noskov V. P. *Navigatsiya BPLA i 3D-rekonstruktsiya vneshney sredy po dannym bortovoy STZ* (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).
9. Haehnel A. S. D., Thrun S. Generalized ICP, *Proceedings of Robotics: Science and Systems (RSS)*, 2009.
10. Mitra N. J. et al. Registration of point cloud data from a geometric optimization perspective, *Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, ACM, 2004, pp. 22—31.
11. Kaz'min V. N., Noskov V. P. *Vydelenie geometricheskikh i semanticheskikh ob'ektov v dal'nometricheskikh izobrazheniyakh dlya navigatsii robotov i rekonstruktsii vneshney sredy* (Selection of geometric and semantic objects in ranging images for robot navigation and reconstruction of the external environment), *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, no. 10 (171), pp. 71—83 (in Russian).
12. Noskov V. P., Kiselev I. O. *Trekhmernyy variant metoda Hafa v rekonstruktsii vneshney sredy i navigatsii* (Three-Dimensional Version of the Hough Method in the Reconstruction of the External Environment and Navigation), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2018, no. 8, pp. 552—560 (in Russian).
13. Noskov V. P., Kiselev I. O. *Vydelenie ploskikh ob'ektov v lineynno strukturirovannykh 3D-izobrazheniyakh* (Selecting flat objects in linearly structured 3D images), *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, no. 2(19), 2018, pp. 31—38 (in Russian).
14. Noskov V. P., Rubtsov I. V., Romanov A. Yu. *Formirovanie ob'edinennoy modeli vneshney sredy na osnove informatsii videokamery i dal'nomera* (Formation of a unified model of the environment based on the information of the video camera and range finder), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2007, no. 8, pp. 2—5 (in Russian).
15. Bylow E. et al. Real-Time Camera Tracking and 3D Reconstruction Using Signed Distance Functions, *Robotics: Science and Systems*, 2013.