

УДК 528.063.1

ПРИМЕНЕНИЕ ИТЕРАЦИОННОГО МЕТОДА ЧИСЛЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЗАИМНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ ДАННЫХ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ



ITERATIVE METHOD OF NUMERICAL OPTIMIZATION APPLICATION FOR SOLVING THE REGISTRATION PROBLEM BASED ON POINT CLOUDS

Шарафутдинова Анжелика Алексеевна
аспирант кафедры инженерной геодезии,
Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I
anzhelikaalexeevna@gmail.com

Аннотация. Настоящая работа направлена на исследование и совершенствование взаимного ориентирования дискретных точечных моделей с использованием точек лазерного сканирования. Приведен анализ классического итерационного алгоритма ближайших точек, который является наиболее используемым методом, а также отражены его недостатки. В настоящей статье для решения задачи оптимизации взаимного ориентирования точечных моделей предлагается метод Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно. Предложенный метод обладает сверхлинейной сходимостью, а также обеспечивает высокую вычислительную производительность в отношении временных затрат на каждую итерацию что может быть наиболее эффективным при решении задач с большим объемом исходных данных.

Ключевые слова: итерационный алгоритм ближайших точек, взаимное ориентирование, метод Broyden-Fletcher-Goldfrab-Shanno, наземное лазерное сканирование, параметры преобразования.

Sharafutdinova Angelika Alekseevna
Postgraduate Student
of Engineering Geodesy Department,
Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University
anzhelikaalexeevna@gmail.com

Annotation. This work is aimed at researching and improving the registration method based on point clouds. The analysis of the traditional iterative closest points algorithm, which is the most used method, is given, and its shortcomings are also reflected. In this article, to solve the problem of optimizing the registration method based on point clouds, the Broyden-Fletcher-Goldfrab-Shanno method is proposed. The proposed method has superlinear convergence rate, and also provides high computational performance in terms of time spent on each iteration, which can be most effective when solving problems with a large amount of source data.

Keywords: iterative closest points, point cloud registration, Broyden-Fletcher-Goldfrab-Shanno, terrestrial laser scanning, datum transformation.

Наземное лазерное сканирование активно применяется для решения различных задач на всех стадиях жизненного цикла зданий и сооружений. Одним из этапов технологической схемы проведения наземного лазерного сканирования является взаимное ориентирование результатов измерений. В практике лазерного сканирования можно выделить два основных метода взаимного ориентирования точечных моделей:

- с использованием специальных марок, которые устанавливаются на объекте до начала измерений с учетом обеспечения их видимости с различных станций лазерного сканирования [1];
- с использованием точек лазерного сканирования, при котором взаимное ориентирование выполняется путем нахождения и совмещения общих точек в двух точечных моделях [2].

Настоящая работа направлена на исследование и совершенствование взаимного ориентирования с использованием точек лазерного сканирования. Классическим методом взаимного ориентирования двух точечных моделей с использованием точек лазерного сканирования является итеративный алгоритм ближайших точек (ICP) [3]. В основе вычислительного алгоритма лежит процесс поиска ближайших точек в двух моделях и вычисления для них параметров преобразования с последующим уточнением общих элементов преобразования для всей модели. При этом одна модель принимается истинной и не меняет своего положения, а вторая является подвижной и стремится занять положение наиболее близкое к истинной модели. Взаимное ориентирование представляет собой последовательный процесс, при котором ориентирование после-

дующей модели и предыдущей происходит до тех пор, пока все модели не будут объединены в единую точечную модель. На основании проведенного анализа общее описание работы алгоритма можно представить следующим образом [3–5]:

1. Поиск соответствующих точек N (количество пар) в двух моделях $Q = \{q_i, \dots, q_n\}$ и $P = \{p_i, \dots, p_n\}$. При этом каждому q_i и p_i принадлежит набор координат (q_{1i}, q_{2i}, q_{3i}) и (p_{1i}, p_{2i}, p_{3i}) соответственно.

2. Вычисление параметров преобразования для точек подвижной модели: R, t – матрицы поворота и смещения между двумя системами координат, с учетом минимизации целевой функции:

$$f(R, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|(Rp_i + t) - q_i\|^2, \quad (1)$$

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}, t = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix}, p_i = \begin{pmatrix} p_{1i} \\ p_{2i} \\ p_{3i} \end{pmatrix}, q_i = \begin{pmatrix} q_{1i} \\ q_{2i} \\ q_{3i} \end{pmatrix}.$$

Тогда функция (1) примет следующий вид:

$$f(R, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_{11}p_{1i} + r_{12}p_{2i} + r_{13}p_{3i} + t_1 - q_{1i})^2 + (r_{21}p_{1i} + r_{22}p_{2i} + r_{23}p_{3i} + t_2 - q_{2i})^2 + (r_{31}p_{1i} + r_{32}p_{2i} + r_{33}p_{3i} + t_3 - q_{3i})^2. \quad (2)$$

Следовательно ошибка $f(R, t)$ есть средняя квадратическая ошибка взаимного ориентирования.

Рассмотрим более детально последовательность вычислений параметров преобразования в классическом алгоритме ICP [3–5].

Шаг 1. Вычисление центра масс μ_Q, μ_P для каждой точечной модели

$$\mu_Q = \frac{1}{|N|} \sum_{(i,j) \in N} q_i, \\ \mu_P = \frac{1}{|N|} \sum_{(i,j) \in N} p_i. \quad (3)$$

Шаг 2. Вычисление центрированных векторов для каждой точечной модели

$$Q' = \{q_i - \mu_Q\} = \{q'_i\}, \\ P' = \{p_i - \mu_P\} = \{p'_i\}. \quad (4)$$

Шаг 3. Вычисление ковариационной матрицы центрированных векторов

$$W = \sum_{(i,j) \in N} q'_i p_i'^T. \quad (5)$$

Шаг 4. Вычисление сингулярного разложения матрицы W

$$W = UDV^T. \quad (6)$$

В выражении (6) каждая из матриц имеет различные свойства. Матрица D – диагональная и содержит все сингулярные числа. Матрицы U и V матрицы поворота размера 3×3 .

Шаг 5. Вычисление матрицы поворота R

$$R = UV^T. \quad (7)$$

Шаг 6. Вычисление вектора смещения t

$$t = \mu_Q - R\mu_P. \quad (8)$$

Анализ [6–8] показывает, что классический метод имеет ряд недостатков таких как: низкая вычислительная эффективность, необходимость высокого коэффициента перекрытия двух точечных моделей, узкая область сходимости и частое попадание в локальный минимум [6]. Также известно, что точность и сходимость метода, зависит от выбора начальных значений параметров геометрического преобразования, таких как поворот, смещение и изменение масштаба [7]. В некоторых случаях при больших углах поворота точечных моделей друг относительно друга и при симметричных объектах в двух точечных моделях, критерий может не сойтись к минимуму.

В настоящее время ведутся исследования над совершенствованием алгоритма ИСР, в том числе над повышением эффективности алгоритма ИСР, повышением точности алгоритма и решением проблемы локальных оптимальных решений [9–14].

В настоящей статье для решения задачи оптимизации взаимного ориентирования точечных моделей предлагается метод Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (BFGS) [15, 16]. Метод BFGS является итерационным методом численной оптимизации, который принадлежит классу квазиньютоновских методов. Его отличием является то, что гессиан функции не вычисляется напрямую, т.е. нет необходимости находить частные производные второго порядка. Вместо этого гессиан оценивается приближенно, исходя из сделанных до этого итераций. Приведем обобщенный алгоритм метода [15, 16].

Шаг 1. Инициализация начального вектора параметров преобразования q_0 , установка требуемой точности поиска $\varepsilon > 0$, определение начального приближения $H_0 = B_0^{-1}$, где B_0^{-1} – обратный гессиан функции. На практике за начальное приближение как правило принимают единичную матрицу I .

Шаг 2. Вычисление градиента в начальных параметрах преобразования $\nabla f(q_0)$.

Шаг 3. Определение направления спуска d_0 :

$$d_0 = -H_0 * \nabla f(q_0). \quad (9)$$

Шаг 4. Вычисление следующего вектора параметров преобразования q_{k+1} через рекуррентное соотношение:

$$q_{k+1} = q_k + \alpha_k d_k, \quad (10)$$

где $\alpha_k > 0$ – длина шага, настраиваемая с помощью линейного поиска, который удовлетворяет условиям Вольфе [16]:

$$\begin{aligned} f(q_k + \alpha_k d_k) &\leq f(q_k) + c_1 \alpha_k \nabla f_k^T d_k, \\ \nabla f(q_k + \alpha_k d_k) &\geq c_2 \nabla f_k^T d_k, \end{aligned} \quad (11)$$

где c_1 и c_2 – константы, удовлетворяющие условию $0 \leq c_1 \leq c_2 \leq 1$.

Шаг 5. Определение вектора S_k шага алгоритма на итерации и вектора u_k изменения градиента на итерации:

$$\begin{aligned} S_k &= q_{k+1} - q_k, \\ p_k &= \nabla f(q_{k+1}) - \nabla f(q_k). \end{aligned} \quad (12)$$

Шаг 6. Вычисление гессиана функции на итерации:

$$H_{k+1} = (I - p_k S_k p_k^T) H_k (I - p_k p_k S_k^T) + p_k S_k S_k^T, \quad (13)$$

где $p_k = \frac{1}{p_k^T S_k}$.

Шаг 7. Повторение итерационного процесса до тех пор, пока не выполнится условие $|\nabla f(q_k)| < \varepsilon$.

Предложенный метод BFGS обладает сверхлинейной сходимостью, а также обеспечивает высокую вычислительную производительность в отношении временных затрат на каждую итерацию. В связи с вышеуказанным предлагается адаптация метода BFGS для решения задачи преобразования координат при выполнении взаимного ориентирования точечных моделей.

Литература

1. Наземное лазерное сканирование : монография / В.А. Середович [и др]. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.
2. Шульц Р.В. Наземное лазерное сканирование в задачах инженерной геодезии. – Кишинев : Palmarium Academic Publishing, 2013. – 348 с.
3. Besl P.J., Mc Kay N.D. A method for registration of 3-D shapes // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14 (2). – P. 239–356.
4. Gruen A., Akca D. Least squares 3D surface and curve matching // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2005. – Vol. 59 (3). – P. 151–174.

5. Zhang Z. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces // *International Journal of Computer Vision*. – 1994. – Vol. 13 (2). – P. 119–148.
6. Evaluation of the ICP Algorithm in 3D Point Cloud Registration / P. Li [et al.] // *IEEE Access*. – 2020. – DOI : 10.1109/ACCESS.2020.2986470
7. Вохминцев А.В. Методология решения проблемы одновременной навигации и построения карты на основе комбинирования визуальных и семантических характеристик окружающей среды: дис. ... д. техн. наук, – Челябинск, 2020. – 298 с.
8. Li Y., Wang Y. An accurate registration method based on point clouds and redundancy elimination of lidar data // *ISPRS Archives*. – 2008. – Vol. 37 (5). – P. 605–610.
9. Grant D., Bethe I.J., Crawford M. Point-to-plane registration of terrestrial laser scans // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2012. – Vol. 72. – P. 16–26.
10. Shen Y., Hu L., Li B. Morbidity problems and solutions of bursa model for local region coordinate transformation // *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*. – 2006. – Vol. 35(1). – P. 95–98.
11. Wolf H. Scale and orientation in combined Doppler and triangulation nets // *Bull. Géodésique*. – 1980. – Vol. 54(1). – P. 45–53.
12. Soler T. Acompendium of transformation formula suseful in GPS work // *Journal of Geodesy*. – 1998. – Vol. 72. – P. 482–490.
13. Robust total least squares with reweighting iteration for three-dimensional similarity transformation / J. Lu [et al.] // *Surv. Rev.* – 2014. – Vol. 46 (334). – P. 28–36.
14. Tao Y.Q., Gao J.X., Yao Y.F. TLS algorithm for GPS height fitting based on robust estimation // *Surv. Rev.* – 2014. – Vol. 46 (336). – P. 184–188.
15. Fletcher R. *Practical methods of optimization*. – NY : Wiley, 1988. – 456 p.
16. Nocedal J., Wright S. *Numerical optimization*. – NY: Springer, 2006. – 683 p.

References

1. *Terrestrial laser scanning: monograph* / V.A. Seredovich [et al]. – Novosibirsk : SSGA, 2009. – 261 p.
2. Shults R.V. *Terrestrial laser scanning in problems of engineering geodesy*. – Chisinau : Palmarium Academic Publishing, 2013. – 348 p.
3. Besl P.J., Mc Kay N.D. A method for registration of 3-D shapes // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1992. – Vol. 14 (2). – P. 239–356.
4. Gruen A., Akca D. Least squares 3D surface and curve matching // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2005. – Vol. 59 (3). – P. 151–174.
5. Zhang Z. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces // *International Journal of Computer Vision*. – 1994. – Vol. 13 (2). – P. 119–148.
6. Evaluation of the ICP Algorithm in 3D Point Cloud Registration / P. Li [et al.] // *IEEE Access*. – 2020. – DOI : 10.1109/ACCESS.2020.2986470
7. Vokhmintsev A.V. Methodology for solving the problem of simultaneous navigation and building a map based on a combination of visual and semantic characteristics of the environment: dis. ... d. tech. Science. – Chelyabinsk, 2020. – 298 p.
8. Li Y., Wang Y. An accurate registration method based on point clouds and redundancy elimination of lidar data // *ISPRS Archives*. – 2008. – Vol. 37 (5). – P. 605–610.
9. Grant D., Bethe I.J., Crawford M. Point-to-plane registration of terrestrial laser scans // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2012. – Vol. 72. – P. 16–26.
10. Shen Y., Hu L., Li B. Morbidity problems and solutions of bursa model for local region coordinate transformation // *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*. – 2006. – Vol. 35(1). – P. 95–98.
11. Wolf H. Scale and orientation in combined Doppler and triangulation nets // *Bull. Géodésique*. – 1980. – Vol. 54(1). – P. 45–53.
12. Soler T. Acompendium of transformation formula suseful in GPS work // *Journal of Geodesy*. – 1998. – Vol. 72. – P. 482–490.
13. Robust total least squares with reweighting iteration for three-dimensional similarity transformation / J. Lu [et al.] // *Surv. Rev.* – 2014. – Vol. 46 (334). – P. 28–36.
14. Tao Y.Q., Gao J.X., Yao Y.F. TLS algorithm for GPS height fitting based on robust estimation // *Surv. Rev.* – 2014. – Vol. 46 (336). – P. 184–188.
15. Fletcher R. *Practical methods of optimization*. – NY : Wiley, 1988. – 456 p.
16. Nocedal J., Wright S. *Numerical optimization*. – NY: Springer, 2006. – 683 p.