关于点云配准：

国内外学者对这方面作出了不少研究。1992年，Besl 和 McKay[1]提出了ICP算法，该算法的核心技术是寻求两幅图像的相关点集的最优变换矩阵，但是该方法容易陷入局部最优解无法收敛。自从ICP算法被提出，学者们提出的改进方法层出不穷，文献[2]**[3][4][5]**提高了算法鲁棒性，文献[6]**[7]**提高了算法精度，文献[8]**[9][10][11]**提高了算法速度。1997年，C.S.CHus[12]等人提出基于Point Signature的配准方法，该方法表征形状的能力很强，以致于不同对象同一位置的signature差别很大，另外球体与表面的交点不易获取，尤其是当表面被转化为点云或三角形面片时，可能产生误配准。1998年，J. Tarel[13]利用最小二乘法的原理，采用3L拟合法对两个多边形曲面进行配准，由于该配准方法不需要进行逐点配准，因此运行速度较快，但是想要获得良好的配准结果，必须保证两个模型的初始位置重叠度大于85%。2002年，Ip C Y[14]根据实体模型的形状分布对两个模型进行比对分析，该方法适用于任何文件格式的模型比对，但是该方法获得形状分布的过程较为复杂，且文中未对比对的结果作客观评价；同年，Bernardini F[15]提出多角度配准，并使用纹理颜色辅助配准，该方法能实时地反馈获得的表面信息，同时提出了全局误差的评估方法，但并未对局部误差进行评价和显示。2004年，Yan Sijie [16]将遗传算法应用到复杂曲面的点云配准中以加快配准速度，但是该方法在配准前需要提前获取角点信息，故很难实现自动配准。2008年，Akca D[17]将三维的最小二乘匹配法应用到多个表面配准中，并指出该方法还能用于三维比对等场合，应用广泛，但是多个表面配准容易产生误差叠 加效应，从而无法对误差进行评估。2008年，Aiger等人 [18]提出了4点全等集合（4-PCS）算法，该算法利用4个共平面点基作为特征，对模型和目标点云进行拟合。从模型点云数据中随机选择这些数据，然后在目标数据中搜索4点全等集合。每个匹配项都提供了一个转换，然后测试这两个数据集是否匹配；2014年，Super 4-PCS算法[19]利用三维网格数据，有效提取目标同余基，缩短了计算时间。Mohamad等人[20]建议通过“将两数据集投影到一个公共平面，从所获得的投影点中构造4个基点”（称之为“3D相交点”）来放宽对基点的共平面性约束。然后将两条线之间的正交距离加到匹配4基点的比率中，从而有效地减少匹配过程中不正确基点的数量，同时也减少了不必要的验证步骤；Theiler等人[21]**[22]**提出了对原有4-PCS算法的另一种变式，将注意力集中在关键点上，而不是集中在数据集中的任何点上；2016年,Chen H [23]等人对场景内模型进行扫描，利用4PCS算法对扫描数据和CAD模型点云进行配准，但是采用点云形式来显示配准结果的视觉效果欠佳，且无客观的误差分析。4-PCS算法效率高、鲁棒性好，但是在单个模型中选取的点集若是自我相似或对称时会导致配准失败，使用的场合受限。2009年，L-BFGS算法[24]是BFGS的一种改进算法，它是一种拟牛顿算法，用它实现高精度配准，但是该方法涉及到的非线性方程求解和推导较为复杂， 如Hessian矩阵的求解，BFGS在每次配准运算中都需要存储Hessian矩阵，浪费很多存储空间，而L-BFGS算法只保存最近的m次迭代信息，以降低数据的存储空间，但该方法的空间复杂度仍然很高而未得到广泛利用。2012年，Bosché F[25]提出基于平面的粗配准方法，并应用于建筑物比对，但是该方法需要手动操作。2013年，Kim C[26]等人在提出了基于PCA算法的全局配准和基于ICP算法的局部配准，并应用到建筑物模型的比对中去，能全自动地对模型进行配准，但是配准结果及其误差显示的视觉效果一般；同年，段[27]等人通过引入点云模型形心与质心之间的位置关系， 判断PCA算法是否存在主轴镜像问题，并加以修正。2015年，Holz D[28]等人总结了点云库（PCL）的用法，详细介绍了ICP多个参数以及收敛条件等，并将PCL应用到激光扫描三维点云配准中，得到良好的效果。2015年Poreba, M. 和 F. Goulette[29]提出基于线特征的点云配准，该方法从轮廓的分布来确定刚体变换的参数，但是当出现多条位置、斜率相近的直线段时，会出现误匹配；同年，Hu C[30]等人比较了上颌全口义齿的3D打印蜡模和CAD模型，分析其配准误差，无论正偏差还是负偏差所占比例都很小，配准效果良好，但是该过程是手动的，无法完成自动配准。2016年Ran L I.将遗传算法[31]运用到Powell算法[32]中，使得配准参数能够以一定的精度逼近全局最优，但是遗传算法的步骤增加了寻优算法的复杂度，该算法的精度、可行性、计算复杂度没有定量分析的方法，仍有待考究。正态分布算法（NDT）[33]是利用统计学概率，根据点云正态分布情况确定对应点，进而计算出测量模型和CAD模型之间的变换关系，但是该方法对参数调整要求严格，格子参数太大导致精度降低，参数太小会加大时间复杂度和空间复杂度。近年来，源于深度神经网络（DNN）的学习方法成为研究热点，2017年，Wang[34]等人提出了一种深度遥感图像配准学习框架。将图像补丁对作为输入，匹配标签作为输出，直接学习端到端映射函数。它的隐藏层对应于特征提取器，输出层对应于特征匹配，该方法取得效果良好，但是随着网络层数的加深，所需的训练时间和训练数据大大增加，模型正确性验证复杂，且对硬件性能要求高，训练成本增加。基于全局搜索的代表性算法是采样一致性算法（SAC-IA），2017年，杨[35]等人利用该方法对室内的场景进行点云配准和重建，该方法随机选取几何特征一致的点组成点对，通过计算对应点的变换关系得到最优解，对简单模型可较好地实现配准，但对于一些含有多种特征的复杂对象配准效果不尽人意。2018年，Zhou[36]等人针对复合点集配准问题将期望最大化算法应用到ICP中，使得ICP能稳定收敛且不必提取特征也可得到良好的多角度配准结果，但是该算法时间复杂度高，且需要适合的初始参数。同年，Tong L和Ying X[37]提出一种基于点云2D纹理特征和3D曲率特征的配准方法，实验结果表明该方法效率、精度高，但是该方法的局限性是：需要提前获取3D模型的纹理信息，否则将产生不好的配准效果。2018年，Kim D[38]等人构造出基于Augmented Reality(AR)对3D CAD模型进行增强、配准等处理的系统框架，将其成功地应用到了船舶制造业上，该方法用途广泛，且不需要颜色纹理等特征信息的支撑也能完成配准，但是该过程是半自动的，且不具备实时性。

1. P.J. Besl, N.D. McKay, A method for registration of 3-D shapes, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 14 (1992) 239–256.
2. Pulli, K.: Multiview registration for large data sets. in 3-D Digital Imaging and Modeling. In: Proceedings. Second International Conference on. IEEE 1999, 160–168 (1999)
3. Jost, T., Hugli, H.: A multi-resolution icp with heuristic closest point search for fast and robust 3d registration of range images. In: 3-D Digital Imaging and Modeling: 3DIM 2003. Proceedings. Fourth International Conference on. IEEE 2003, 427–433 (2003)
4. Fitzgibbon, A.W.: Robust registration of 2d and 3d point sets. Image Vis Comput 21(13), 1145–1153 (2003)
5. Rangarajan, A., Chui, H., Mjolsness, E., Pappu, S., Davachi, L.,Goldman-Rakic, P., Duncan, J.: A robust point-matching algorithm for autoradiograph alignment. Medical Image Anal 1(4),379–398 (1997)
6. Sharp, G.C., Lee, S.W., Wehe, D.K.: Icp registration using invariant features. Pattern Anal Mach Intell IEEE Trans 24(1),90–102 (2002)
7. Park, S.-Y., Subbarao, M.: An accurate and fast point-to-plane registration technique. Pattern Recogn Lett 24(16), 2967–2976 (2003)
8. Rusinkiewicz, S., Levoy, M.: ‘‘Efficient variants of the icp algorithm,’’ in 3-D Digital Imaging and Modeling. Proceedings 3rd International Conference on IEEE, 145–152 (2001)
9. Nuchter, A., Lingemann, K., Hertzberg, J.: Cached kd tree search for icp algorithms. In: 3-D Digital Imaging and Modeling:3DIM’07. Sixth International Conference on. IEEE 2007, 419–426 (2007)
10. Park, I.K., Germann, M., Breitenstein, M.D., Pfister, H.: Fast and automatic object pose estimation for range images on the gpu. Mach Vis Appl 21(5), 749–766 (2010)
11. [11] Esteghamatian, M., Azimifar, Z., Radau, P., Wright, G.: Real time cardiac image registration during respiration: a time series prediction approach. J Real Time Image Process 8(2), 179–191(2013)
12. C.J.R. Chua, Point signatures: a new representation for 3d object recognition, Int. J. Comput. Vision 25 (1) (1997) 63–85.
13. J. Tarel, H. Civi, D. Cooper, Pose estimation of free-form 3d objects without point matching using algebraic surface models, in: Proceedings of IEEE Workshop on Model-Based 3D, 1998, pp. 13–21.
14. Ip C Y, Lapadat D, Sieger L, et al. Using shape distributions to compare solid models[C]// ACM Symposium on Solid Modeling and Applications. ACM, 2002:273-280.
15. Bernardini F, Rushmeier H. The 3D Model Acquisition Pipeline[C]// Computer Graphics Forum. Blackwell Publishers Ltd, 2002:149–172.
16. Sijie Yan, Yunfei Zhou, Fangyu Peng, Xide Lai, Research on the localisation of the workpieces with large sculptured surfaces in NC machining, Int. J.Adv. Manuf. Technol. 23 (2004) 429–435.
17. Akca D. Co-registration of surfaces by 3D least squares matching.[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2008, 76(3):307-318.
18. D. Aiger, N.J. Mitra, D. Cohen-or, 4-points congruent sets for robust pairwise surface registration, ACM Trans. Graph. 27 (3) (2008) 1,
19. N. Mellado, D. Aiger, N.J. Mitra, Super 4PCS fast global pointcloud registration via smart indexing, Comput. Graph. Forum 33 (5) (2014) 205–215.
20. M. Mohamad, M. Ahmed, D. Rappaport, M. Greenspan, Super Generalized 4PCS for 3D Registration, (2015), pp. 598–606,
21. P.W. Theiler, J.D. Wegner, K. Schindler, Keypoint-based 4-points congruent sets -automated marker-less registration of laser scans, ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 96 (2014) 149–163,
22. P.W. Theiler, J.D. Wegner, K. Schindler, Fast registration of laser scans with 4-point congruent sets - what works and what doesn’t, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. II-3 (September) (2014) 149–156,
23. Chen H, He H, Mo J, et al. 3D registration based perception in augmented reality environment[J]. Cogent Engineering, 2016, 3(1).
24. Yang F, Ding M, Zhang X, et al. Non-rigid multi-modal medical image registration by combining L-BFGS-B with cat swarm optimization[J]. Information Sciences An International Journal, 2015, 316(C):440-456.
25. Bosché F. Plane-based registration of construction laser scans with 3D/4D building models[J]. Advanced Engineering Informatics, 2012, 26(1):90-102.
26. Kim C, Son H, Kim C. Fully automated registration of 3D data to a 3D CAD model for project progress monitoring[J]. Automation in Construction, 2013, 35(4):587-594.
27. 段黎明,王侃,陈中. 工业CT重建模型与原始CAD模型粗配准的改进[J]. 计算机集成制造系统,2013,19(04):673-679.
28. Holz D, Ichim A E, Tombari F, et al. Registration with the Point Cloud Library: A Modular Framework for Aligning in 3-D[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2015, 22(4):110-124.
29. Poreba M, Goulette F. A robust linear feature-based procedure for automated registration of point clouds.[J]. Sensors, 2015, 15(1):1435.
30. Hu C, Han W, Lv P, et al. Quantitative Evaluation of Tissue Surface Adaption of CAD-Designed and 3D Printed Wax Pattern of Maxillary Complete Denture[J]. Biomed Research International, 2015, 2015(2, article 7):1-5.
31. Ji S, Ren Y, Ji Z, et al. An Improved Method for Registration of Point Cloud[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 140.
32. Ran L I. Infrared and Visual Image Registration Based on Maximization of Mutual Information[J]. Computer Knowledge & Technology, 2008.
33. Magnusson M , Andreasson H , Nuchter A , et al. Appearance-based loop detection from 3D laser data using the normal distributions transform[C]// 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2009.
34. Wang S, Quan D, Liang X, et al. A deep learning framework for remote sensing image registration ☆[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2018.
35. 杨永涛,黄国言,吴培良. 一种利用关键点提取的改进ICP三维彩色点云场景配准方法[J]. 小型微型计算机系统,2017,38(09):2139-2145.
36. Zhou Y, Xu S, Jin C, et al. Multiple point sets registration based on Expectation Maximization algorithm [J]. Computers & Electrical Engineering, 2018, 70:1-11.
37. Tong L, Ying X. 3D Point Cloud Initial Registration Using Surface Curvature and SURF Matching[J]. 3d Research, 2018, 9(3):41.
38. Kim D, Park J, Ko K H. Development of an AR based method for augmentation of 3D CAD data onto a real ship block image[J]. Computer-Aided Design, 2018, 98.