

三维空间标记点分布拓扑对计算机辅助骨科手术定位精度的影响

李秦, 彭远卓, 刘文勇

北京航空航天大学生物与医学工程学院, 北京 100191

摘要 空间配准是计算机辅助骨科手术的关键步骤, 配准精度直接影响导航效果。本文针对基于二维图像的视觉配准方法, 通过理论分析和计算机仿真, 研究该方法常用的双平面定位标尺标记点分布拓扑对定位精度的影响, 得到了标记点间距、数目等因素对定位精度的影响规律, 给出了定位误差在空间上的分布特点。研究表明, 增加标记点的数目和间距有助于减小定位误差; 并且, 在包络外接圆半径相等时, 五点四边形的分布拓扑方式较四点矩形和四点三角形更优。

关键词 标记点分布拓扑; 空间配准; 误差分析; 计算机辅助骨科手术

在计算机辅助骨科手术中, 配准用于建立智能手术设备(导航系统、机器人等)、手术器械、患者等手术空间的对象与不同模态医学图像之间的坐标映射关系, 可以在图像上实时叠加显示手术空间对象的准确位姿, 提升医生的术中判断能力或引导机器人操作^[1]。机器人辅助骨科手术中常用基于标记点(云)的配准方法, 具体包括: 基于标记点(fiducial)的配准(既可以是解剖特征点, 也可以是外加标志点)和基于解剖结构表面点云的配准^[2], 前者常用于二维图像配准。

针对基于标记点的空间配准方法, 很多学者研究了其靶点配准误差(target registration error, TRE)的分布特性及标记点分布方式对TRE的影响。Wiles等^[3]认为: TRE与标记点的分布拓扑有关; 处于标记点几何中心的靶点的TRE与比较小, 并且随着标记点数目的增加TRE减小。Shamir等^[4-5]针对神经外科手术提出了一种标记点最优化分布方式, 以最小化TRE; Battezzato等^[6]采用遗传算法对标记点分布方式进行了优化; Franaszek等^[7]提出了两个用于优化标记点分布拓扑的评价指标, 无需进行实际配准即可对标记点的分布拓扑进行评价。

双平面定位是一种典型的基于二维图像的配准方法。该方法使用了一种带有标记点的双层平面结构的定位模型

(依据其几何外形, 常称为“标尺”), 利用计算机视觉原理对空间靶点进行定位。该方法的优势在于: 采用术中透视图像, 可直接反映手术部位的术中状态^[8]; 无需求解C形臂的内、外参数, 利用线性方法即可实现定位^[9]; 并且, 所用的C形臂是骨科临床中的常规成像设备, 在县级及以上医院的普及度高。因此, 该方法具有很好的临床应用价值, 并已经在创伤骨科和立体定向神经外科中得到了应用^[10]。为进一步优化标尺构型, 有必要通过分析和仿真来明确标记点的空间分布拓扑对标尺定位精度的影响。

双平面定位的原理如图1所示, 其中, $\{O_0\}$ 为世界坐标系; $\{O_1\}$ 和 $\{O_2\}$ 分别为双平面标尺在不同位置的标尺坐标系, 各个坐标系的相对位置关系已知; 图像1和图像2为C形臂在不同位姿下采集的图像。

为对空间中的点 P 进行定位, 需借助标尺上的标记点。以图像1为例, 已知靶点在图像1中的投影点 e_1 的坐标, 则可根据标记点在图像1中的坐标和在 $\{O_1\}$ 中的坐标, 反解出靶点的投影线与双层平面的交点 a_1, b_1 在 $\{O_1\}$ 中的坐标, 从而确定靶点 P 的投影线 l_1 ; 同理, 由图像2可确定靶点 P 的投影线 l_2 。 $\{O_0\}$ 、 $\{O_1\}$ 和 $\{O_2\}$ 的相对位置已知, 即可将 l_1 和 l_2 统一于 $\{O_0\}$ 坐标系下, 求解两条直线的交点坐标, 即 P 点坐标。

收稿日期: 2017-05-09; 修回日期: 2017-06-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2015AA043201)

作者简介: 李秦, 硕士研究生, 研究方向为生物医学信息及仪器, 电子信箱: 869240338@qq.com; 刘文勇(通信作者), 讲师, 研究方向为医用机器人技术, 电子信箱: wylu@buaa.edu.cn

引用格式: 李秦, 彭远卓, 刘文勇. 三维空间标记点分布拓扑对计算机辅助骨科手术定位精度的影响[J]. 科技导报, 2017, 35(19): 56-61; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.19.007

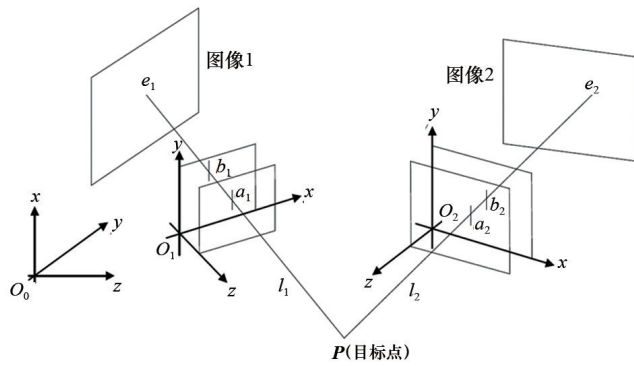


图1 双平面空间定位原理

Fig. 1 Principle of bi-planar positioning method

1 定位误差理论分析

双平面定位算法的核心步骤是反解靶点的投影线与双层平面中每个面的交点的过程,即二维点配准过程。也就是说,定位误差受二维配准误差的影响。West^[11]等将三维点配准的误差模型表示为靶点 r 处的误差变量 TRE 的平方的期望值:

$$E[TRE^2(r)] = \frac{E[FLE^2]}{N} \left(1 + \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 \left(\frac{d_k^2}{M_k^2} \right) \right) \quad (1)$$

式中, FLE 为标记点定位误差; N 为标记点数目; M_k^2 为所有标记点到其第 k 个主轴的距离平方和; d_k 为靶点 r 到第 k 个主轴的距离。

根据式(1),对于处在同一平面上的二维点,有

$$E[TRE^2(r)] = \frac{E[FLE^2]}{N} \left[1 + \frac{1}{3} \left(\sum_{k=1}^2 \left(\frac{d_k^2}{M_k^2} \right) + \frac{\sum_{k=1}^2 d_k^2}{\sum_{k=1}^2 M_k^2} \right) \right] \quad (2)$$

由此可知,影响二维配准精度的因素有 N 、 M_k^2 和 d_k ,其中, N 和 M_k^2 又受到标记点分布拓扑的影响。因此,标记点分布拓扑必然影响最终的定位误差。

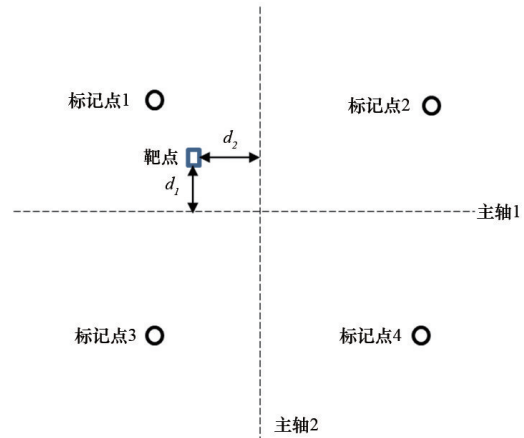


图2 二维配准示意

Fig. 2 Diagram of 2D registration

双平面定位系统的数学模型涉及的变量较多^[2],难以用级数展开法进行直接分析^[12]。因此,本文采用蒙特卡罗模拟方法,对影响定位误差的各个变量进行仿真分析。蒙特卡罗模拟方法是一种通过对随机变量进行统计试验和随机模拟,求解实际问题近似解的数值方法,一般步骤是:对各个直接测量量加上随机误差;利用统计方法找出各直接测量量的影响规律,以期对系统进一步优化。

2 蒙特卡罗仿真分析

仿真流程如下:1) 根据设定的标尺构型,输入双平面标尺的标记点和目标点的三维坐标;2) 模拟图像拍摄过程,生成标记点和靶点的二维图像坐标 (x, y) ;3) 以 (x, y) 为名义真值,在其上分别添加误差 e_x, e_y 模拟拾取误差。假设拾取标记点和靶点的误差是独立同分布、各向同性的, e_x, e_y 均服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$ ^[13],取 σ 为 5 个像素,样本数目为 50000。

双平面定位方法需要在两个不同的位姿下对定位标尺进行成像。图3显示了一种 4×4 矩形拓扑双层平面(包络长

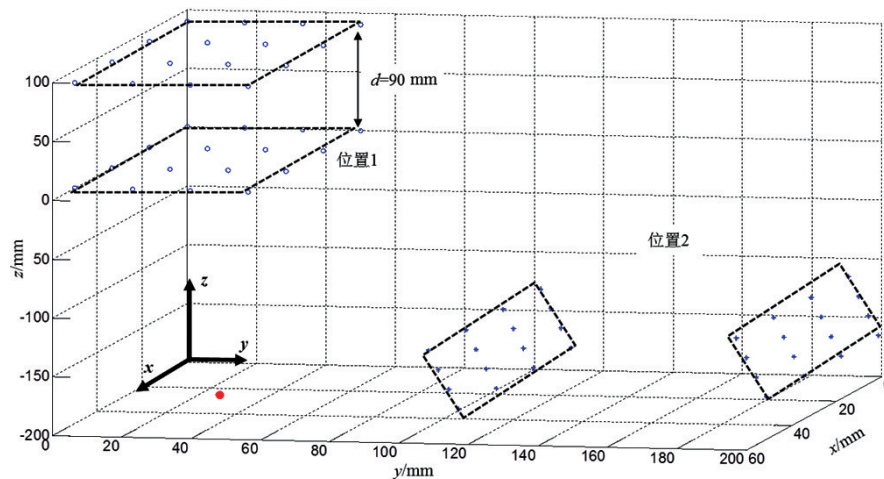


图3 双平面定位仿真示意

Fig. 3 Simulation of bi-planar positioning method

宽均为 50 mm, 两层平面的间距为 90 mm) 的标尺结构; 靶点以红色标识出。标尺从位置 1 沿 y 方向移动 101.877 mm, z 方向移动 -131.55 mm, 并绕 x 轴旋转 80° , 变换至位置 2。在仿真实验中, 仅改变标尺的构型, 标尺的相对位置均相同。

2.1 矩形网格拓扑

矩形网格拓扑为双平面视觉标定中常见的标记点拓扑分布方式, 单层平面的标记点分布如图 4 所示, 标记点分布在每个矩形单元的 4 个顶点上; 整个矩形单元网格的外包络仍为矩形。

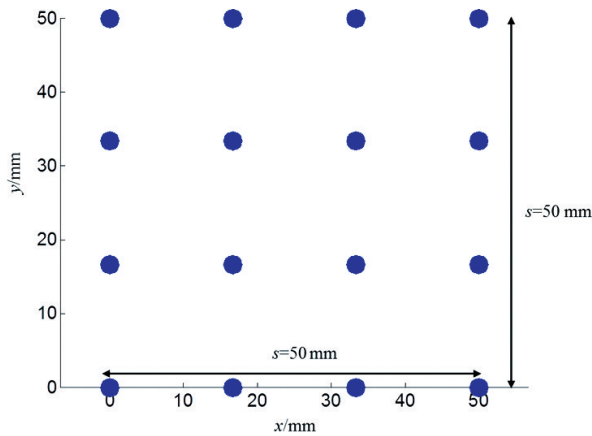


图 4 数目为 4×4、包络长宽均为 50 mm 的矩形网格分布拓扑示意

Fig. 4 Diagram of 4×4 rectangular configuration with 50 mm each length

2.1.1 点的数目对定位精度的影响

设定: 标记点的矩形单元网格的外包络的边长 $s=50$ mm, 两层平面相互平行且间距 $d=90$ mm、相互偏移为 0 (即从 z 方向上看, 两平面重合); 单层标记点的数目分别为 2×2、3×3、4×4、5×5、6×6、7×7 和 8×8。将靶点设置在标记点的几何中心正下方, 坐标为 (25 mm, 25 mm, -200 mm)。采用均方根误差 $RMSE$ 衡量标定结果和真值的偏差, 有变量

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{obs,i} - x_{model,i})^2}{n}} \quad (3)$$

式中, $x_{obs,i}$ 为第 i 次的观测值, $x_{model,i}$ 为真值。

分别计算 x 、 y 、 z 坐标分量的 $RMSE$, 进而得到总误差 $RMSE_{xyz}$

$$RMSE_{xyz} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2 + RMSE_z^2} \quad (4)$$

图 5 给出了 $RMSE$ 随标记点数目 N 的变化, 可知标记点越多, 定位结果误差越小, 且 x 、 y 、 z 方向上的分量误差均在减小。标记点数目由 2×2 增至 4×4, 误差迅速降低, 且降低幅度较大; 从 4×4 增至 7×7, 误差降低较缓慢, 幅度也较小。

随着标记点数目 N 的增加, 式(2)中的 M_k^2 也在增大, 如图 6 所示。因此, TRE 的减小主要是 N 增大和 M_k^2 增大综合影响的结果。

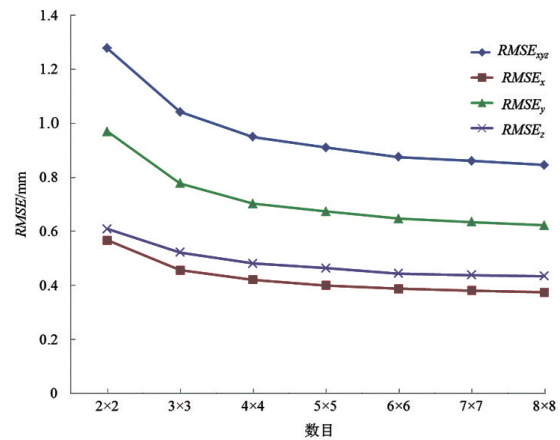


图 5 $RMSE$ 随标记点数目变化情况

Fig. 5 Influence of fiducials number on $RMSE$

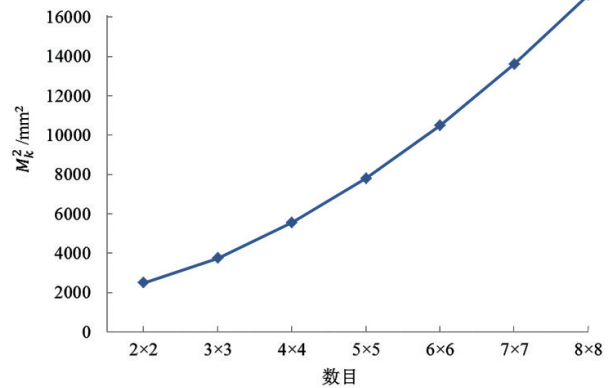


图 6 M_k^2 随标记点数目变化情况

Fig. 6 Influence of fiducials number on M_k^2

2.1.2 点的间距对定位精度的影响

设定: 标记点的分布拓扑为矩形单元网格、数目为 4×4、两层平面间距 $d=90$ mm、且上下层平面偏移为 0; 选取的靶点, 在正位时位于下层标记点的几何中心正下方 200 mm 处。图 7 给出了 $RMSE$ 随标记点间距的变化情况。

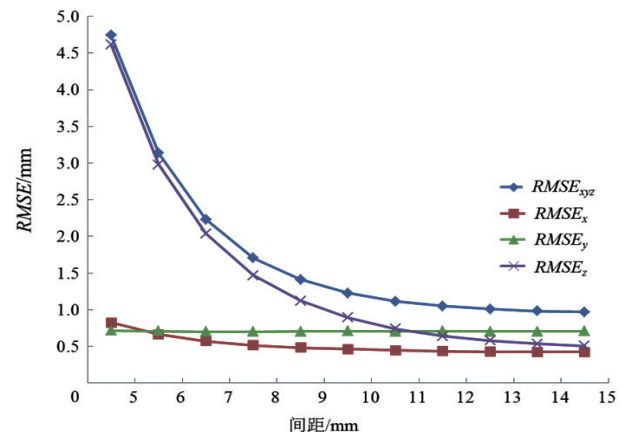


图 7 均方根误差随标记点间距变化示意

Fig. 7 Influence of fiducials' intervals on $RMSE$

可知:标记点间距越大,定位结果误差越小,除了在 y 方向上,误差的下降不明显, x 、 z 方向上的分量误差均在下降,且 z 方向上的下降最为显著。标记点间距由5 mm增至9 mm时,误差迅速下降,且下降幅度较大;从9 mm增至15 mm时,误差降低较为缓慢,幅度也比较小。

随着 d 的增大,式(2)中的 M_k^2 也在增大,如图8所示。因此, TRE 的减小主要是由于标记点间距增大导致 M_k^2 的增大。

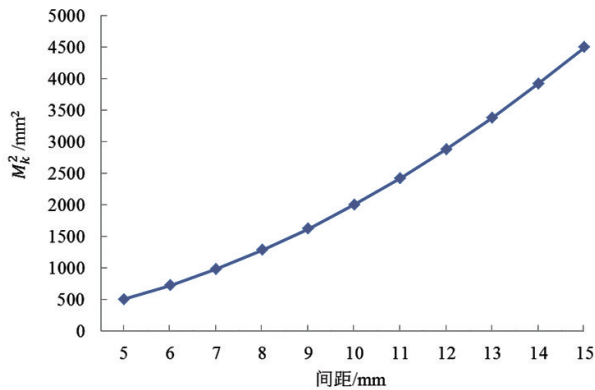


图8 M_k^2 随标记点间距变化示意
Fig. 8 Influence of fiducials' intervals on M_k^2

2.1.3 靶点配准误差的空间分布

空间位置不同的靶点,在同一成像过程中,由于其投影线同标记点平面的交点不同, d_k 也不同。其投影点越靠近标记点的几何中心,误差越小;否则误差越大。

为研究 TRE 的空间分布,选取空间中的243个靶点(这些靶点在空间中形成 $9 \times 9 \times 3$ 的网格)进行仿真。所选取的标尺构型为:标记点的矩形单元网格的外包络的边长 $s=50$ mm、数目为 4×4 、两层平面间距 $d=90$ mm、且上下层平面偏移为0。图9展示了 TRE 空间分布的结果,其中球的大小代表对应位置 TRE 的大小,可以看出,在 x 方向上,中心位置的 TRE 较小,两边的 TRE 较大;在 y 方向上,该趋势表现不明显。这是由于在位置2的投影图像上,靶点的投影坐标在 x 方向上更为分散, d_k 的取值范围更大,因这种靶点的投影点越远离标记点几何中心,误差越大的趋势表现得越明显。

2.2 典型的标记点分布拓扑比较

选取四点三角形、四点矩形、五点四边形这三种典型分布拓扑进行分析。五点四边形拓扑中单层平面的标记点分布如图10(a)所示,标记点共有5个,其中4个分布在正方形的4个顶点上,第5个点位于正方形的中心。四点三角形拓扑中单层平面的标记点分布如图10(b)所示,标记点共有4个,其中3个分布在等边三角形的3个顶点上,第4个点位于等边三角形的中心。

将图10中的两种标记点分布拓扑与 2×2 矩形拓扑进行对比分析。这3种标记点拓扑的外接圆半径相等(20 mm)的情况下,各自靶点的中心位于标记点的几何中心的正下方,

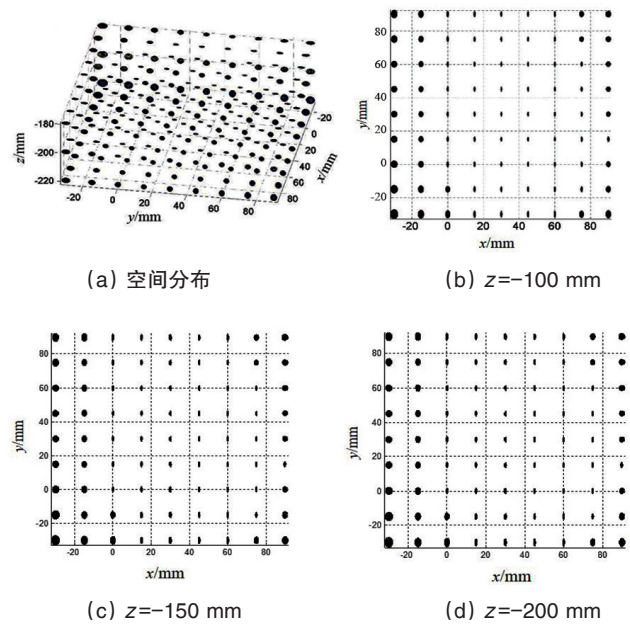


图9 TRE 的分布
Fig. 9 TRE distribution

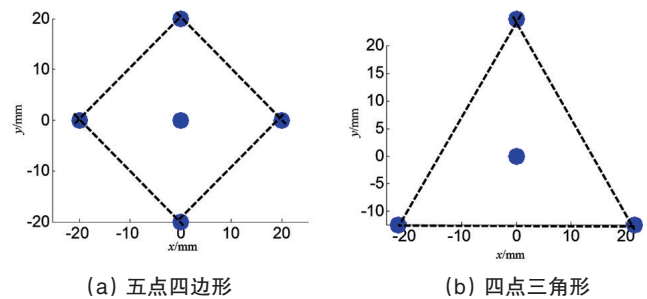


图10 拓扑分布示意
Fig. 10 Diagram of different configuration

并在空间中形成了 $5 \times 5 \times 3$ 的网格, x 、 y 方向间距为10 mm, z 方向间距为50 mm。表1给出了在沿 z 轴3个不同的平面上,3种不同的拓扑所得到的25个点的误差均值。

图11给出了3种拓扑误差大小的比较,其中,四点三角形拓扑的误差在所有的75个点上均为最大,占总点数的100%。而五点拓扑的误差在所有的75个点上均为最小。因此可以得出结论,在包络外接圆半径相等的情况下,五点四边形的分布拓扑是最优的。

表1 3种不同拓扑的误差均值
Table 1 Mean RMSEs of three configurations

z/mm	$RMSE/mm$		
	四点三角形	四点矩形	五点四边形
-100	2.4600	1.2355	1.1912
-150	1.7918	1.1828	1.1134
-200	5.1505	2.9052	2.7501

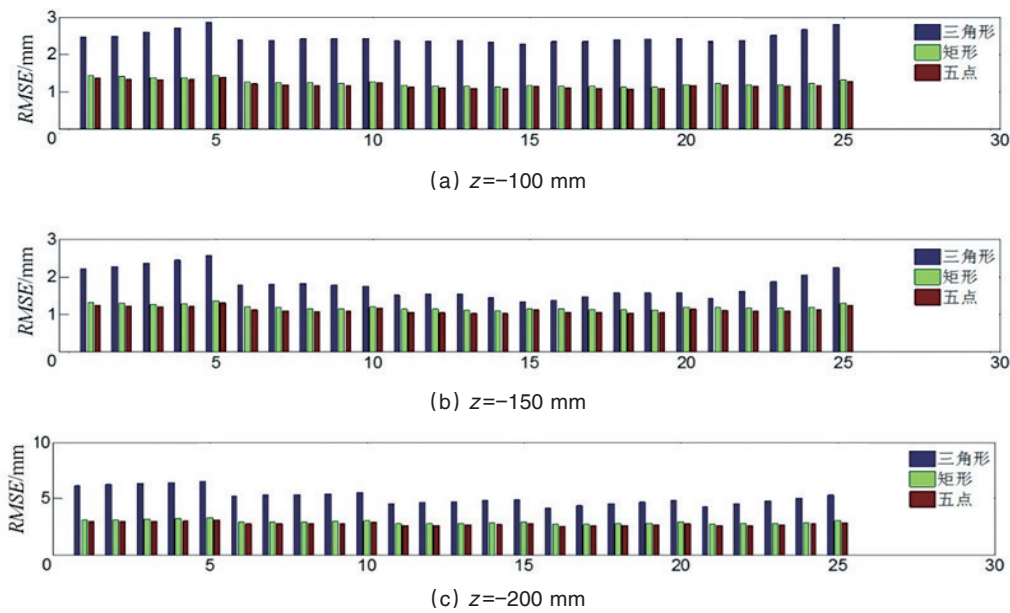


图 11 3种分布拓扑误差
Fig. 11 Error of different configurations

3 讨论

空间定位的精度直接影响计算机辅助骨科手术的效果。本文针对双平面定位方法,从理论和仿真角度分析了双平面标尺标记点分布拓扑对定位精度的影响。张薇等^[14]从算法优化的角度对双平面定位算法进行了改进,本文在此基础上进行标记点分布拓扑分析。理论分析表明,将 West 等^[11]推导的三维点配准的误差模型扩展到双平面定位方法,这种做法的合理性在于双平面定位方法采用了射影变换来计算靶点投影线同两层平面的交点,而该过程本质上是一个二维点的配准过程。因此可以得到以下推论:式(1)中与标记点分布拓扑相关的变量也会影响双平面定位的精度。仿真实验的结果说明了这一推论的合理性。

从仿真实验结果看,影响定位精度的与标记点分布拓扑相关的变量主要是 N 和 M_k^2 。由于实验中标记点的包络边长是固定的,所以增加 N 时的间距 d 是减小的,因此影响定位误差的根本因素是 M_k^2 ,而非 d 。在 3 种典型分布拓扑中,五点四边形分布方式的精度最高,这一方面是由于它的 N 比另外两种多;另一方面,相对于四点三角形分布方式,其分散在外周的标记点数目更多, M_k^2 更大,因而精度更高。

仿真结果还说明了靶点定位误差 TRE 在空间的分布特性,即:靶点投影线与双层平面的交点越靠近标记点的几何中心,误差越小。这与式(2)的结论也相符合。直观理解,在二维配准过程中,旋转矩阵的误差,对于靠近标记点几何中心的点影响较小,对于远离标记点几何中心的点则影响较大。可见,标记点的分布拓扑对于定位精度是有影响的。合理的选择标记点的分布拓扑,对于提高双平面定位精度有着重要的意义。

4 结论

研究表明,双平面空间标尺分布拓扑对误差有以下影响:靶点定位误差的大小是同分布拓扑有关系的;对于矩形包络分布方式,标记点的数目 N 越大,误差越小;对于矩形包络分布方式,标记点之间的间距越大,误差越小;靶点定位误差在空间中的分布规律是:靶点的投影线与双层平面的交点越靠近标记点的几何中心,误差越小;在外接圆半径相同的情况下,五点四边形的分布拓扑同四点三角形和四点正方形拓扑相比是最优的。以上结论为双平面标记点分布拓扑的选择和优化提供了依据。

参考文献 (References)

- [1] Lavallee S. Registration for computer integrated surgery: methodology, state of the art [M]//Taylor R H, Lavallée S, Burdea G C, Mösges R, eds. Computer-Integrated Surgery: Technology and Clinical Applications. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1995: 77-97.
- [2] 栾胜. 机器人辅助微创骨科配准理论与方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010.
Luan Sheng. Registration theory and methods for robot-assisted minimal invasive orthopaedic surgery[D]. Beijing: Beihang University, 2010.
- [3] Wiles A D, Likholyot A, Frantz D D, et al. A statistical model for point-based target registration error with anisotropic fiducial localizer error [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2008, 27(3): 378-390.
- [4] Shamir R R. Optimal landmarks selection and fiducial marker placement for minimal target registration error in image-guided neurosurgery [C]//Proceedings of 7261, Medical Imaging 2009: Visualization, Image-Guided Procedures, and Modeling, Lake. Buena Vista, FL, USA: SPIE, 2009: 72612N.
- [5] Shamir R R, Joskowicz L, Shoshan Y. Fiducial optimization for minimal target registration error in image-guided neurosurgery[J]. IEEE Transac-

- tions on Medical Imaging, 2012, 31(3): 725-737.
- [6] Battezzato A, Gastaldi L, Pastorelli S. Evaluation of the factors affecting the optimal fiducial configurations calculated through a genetic-algorithm-based methodology in image-guided neurosurgery[J]. International Journal of Medical Robotics & Computer Assisted Surgery, 2011, 7(4): 441-451.
- [7] Franaszek M, Cheek G S. Selection of fiducial locations and performance metrics for point-based rigid-body registration[J]. Precision Engineering, 2016, 47: 362-374.
- [8] 王田苗, 刘文勇, 胡磊. 医用机器人与计算机辅助手术 MRCAS 进展[J]. 中国生物医学工程学报, 2008, 27(1): 137-145.
Wang Tianmiao, Liu Wenyong, Hu Lei. Progresses of medical robotics and computer assisted surgery (MRCAS)[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2008, 27(1): 137-145.
- [9] Lavallee S, Troccaz J, Sautot P. Computer-assisted spine surgery using anatomy-based registration[M]//Taylor R H, Lavallée S, Burdea G C, et al. Computer-Integrated Surgery: Technology and Clinical Applications [M]. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1995: 425-429.
- [10] Lei H, Sheng L, Manyi W, et al. A biplanar robot navigation system for the distal locking of intramedullary nails[J]. International Journal of Medical Robotics & Computer Assisted Surgery, 2010, 6(1): 61-65.
- [11] West J B, Fitzpatrick J M, Toms S A, et al. Fiducial point placement and the accuracy of point-based, rigid body registration [J]. Neurosurgery, 2001, 48(4): 816-817.
- [12] 刘文勇, 王满宜, 王田苗, 等. 计算机辅助髓内钉远端锁定系统误差分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(9): 850-854.
Liu Wenyong, Wang Manyi, Wang Tianmiao, et al. Error analysis of a computer-assisted orthopedic system for distal locking of intramedullary nail [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(9): 850-854.
- [13] Moghari M H, Abolmaesumi P. Distribution of target registration error for anisotropic and inhomogeneous fiducial localization error [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2009, 28(6): 799-813.
- [14] 张薇, 黄毓瑜, 栾胜, 等. 基于射影变换的骨科机器人双平面定位方法[J]. 材料科学与工艺, 2006, 14(增刊): 83-86.
Zhang Wei, Huang Yuyu, Luan Sheng, et al. A projective transformation based biplanar positioning algorithm for orthopaedic robot[J]. Materials Science & Technology, 2006, 14(Suppl): 83-86.

Influence of fiducials configuration on the targeting error in the computer-aided orthopaedic surgery

LI Qin, PENG Yuanzhuo, LIU Wenyong

School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract The registration is a critical step in the computer assisted orthopaedic surgery (CAOS). The accuracy of the registration directly affects the effect of the navigation. In this paper, the influence of the fiducials configuration on the accuracy of the bi-planar method widely applied in the fluoroscopy-based navigation is investigated through theoretical analysis and computer simulation. The error distribution characteristics under the influence of the factors such as the distance between the fiducials and the number of the fiducials are obtained. The results indicate that increasing the number and spacing of the fiducials can reduce the positioning error. The configuration of the 5-point quadrangle yields a smaller error than the configurations of 4-point rectangles and 4-points triangles. This research provides a reference for the fiducials configuration selection to improve the registration accuracy in the CAOS.

Keywords configuration of fiducials; space registration; error analysis; computer assisted orthopaedic surgery

(责任编辑 刘志远)