

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl<sup>7</sup>

G01B 11/00

G06T 15/00 B25J 13/00

B25J 19/00



# [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 02158887.2

[43] 公开日 2004 年 7 月 14 日

[11] 公开号 CN 1512135A

[22] 申请日 2002. 12. 30 [21] 申请号 02158887. 2

[71] 申请人 中国科学院沈阳自动化研究所

地址 110004 辽宁省沈阳市和平区三好街 96 号

[72] 发明人 董再励 郝颖明 周 静 朱 枫

王 俊 欧锦军

[74] 专利代理机构 沈阳科苑专利商标代理有限公司

代理人 许宗富 周秀梅

权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 2 页

[54] 发明名称 机器人直线轨迹特性测量方法及所用测量装置

[57] 摘要

本发明属于机器人技术领域，具体地说是一种机器人直线轨迹特性测量方法及所用测量装置。利用结构光 3D 视觉测量原理，采用线结构光与 CCD 摄像机结合构成传感器，形成结构光反射成象的几何模型，通过传感器在运动中对参考物体连续扫描成象，运用视觉图象处理技术，计算出传感器相对参考物体坐标系的连续位姿关系；以实现机器人直线轨迹性能的检测。本发明造价低廉、使用方便，性能好，实用性强，可以完成非接触式机器人直线轨迹与重复性测量。

I S S N 1 0 0 8 - 4 2 7 4

1. 一种机器人直线轨迹特性测量方法，其特征在于：利用结构光 3D 视觉测量原理，采用线结构光与 CCD 摄像机结合构成传感器，形成结构光反射成象的几何模型，通过传感器在运动中对参考物体连续扫描成象，运用视觉图象处理技术，计算出传感器相对参考物体坐标系的连续位姿关系；以实现机器人直线轨迹性能的检测。

2. 根据权利要求 1 所述的机器人直线轨迹特性测量方法，其特征在于：设定参考物体坐标系  $F$ 、机器人末端坐标系  $E$ 、传感器坐标系  $S$ ，则这三个坐标系之间的位姿关系如公式由公式 (2) 决定：

$$M_{FE} = M_{FS} \cdot M_{SE} \quad (2)$$

3. 根据权利要求 2 所述的机器人直线轨迹特性测量方法，其特征在于：所述  $M_{SE}$  为机器人末端坐标系  $E$ 、传感器坐标系  $S$  之间的位姿关系，采用手眼标定方法得出。

4. 根据权利要求 2 所述的机器人直线轨迹特性测量方法，其特征在于：所述参考物体坐标系  $F$  和机器人末端坐标系  $E$  之间位姿关系  $M_{FE}$  计算为：根据结构光的 3D 视觉计算机理，当线光源投射到所述轨道上时，在所述三个棱上的成像形成三个拐点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ ，确定这三个拐点在  $F$  和  $S$  下的坐标，可求出  $S$  相对  $F$  的位姿关系  $M_{FS}$ ；其中：三个拐点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  在  $S$  下的坐标可由传感器形成的几何模型和成象位置计算出；在  $F$  下的坐标计算由下述方法计算：定义  $F$  在量轨上，平面  $DCB'$  为量轨的横切面，且与  $Y_F Z_F$  平面平行， $F$  的原点始终定义在点  $C$  上，平面  $ABC$  为线结构光投射在量轨上所形成，直线  $\vec{DC}$  的长度由机械加工尺寸确定，直线  $\vec{AC}$  的长度可以根据  $A$ 、 $C$  两点在  $S$  坐标系下的坐标求出，则点  $A$  在  $F$  下的坐标  $A_F$  ( $X_{AF}$ ,  $Y_{AF}$ ,  $Z_{AF}$ ) 为：

$$\begin{cases} X_{AF} = \|\vec{AD}\| = \|\vec{AC}\| \sin \arccos(\|\vec{DC}\| / \|\vec{AC}\|) \\ Y_{AF} = -h \\ Z_{AF} = h(\|\vec{BC}\| / 2) \end{cases} \quad (3)$$

其中， $h$  为量轨棱高；同理，可得到点  $B$  在  $F$  下的坐标  $B_F$  ( $X_{BF}$ ,  $Y_{BF}$ ,  $Z_{BF}$ ) 为：

$$\begin{cases} X_{BF} = \pm \|\vec{BC}\| \sin \arccos(\|\vec{DC}\| / \|\vec{BC}\|) \\ Y_{BF} = 0 \\ Z_{BF} = \|\vec{BC}\| \end{cases} \quad (4)$$

5. 根据权利要求4描述的机器人直线轨迹特性测量方法,其特征在于:根据结构光投射的角度,定义 $X_{BF}$ 的正负;且指定S沿量轨长轴运动时,各轴方向不变。

6. 根据权利要求3或4描述的机器人直线轨迹特性测量方法,其特征在于:所述 $M_{FS}$ 通过测量计算拐点A、B、C在量轨模型F和传感器S下的坐标求出后求解S与F间的位姿变换关系 $M_{FS}$ , $M_{FS}$ 与三个拐点的表达式为(5):再利用矩阵求解法可解出 $M_{FS}$ ;

$$(A_F, B_F, C_F) = M_{FS}(A_S, B_S, C_S) \quad (5)$$

7. 一种根据权利要求1所述的机器人直线轨迹特性测量方法所用测量装置,其特征在于:由传感器(包含CCD摄像机、激光器、反射镜)、量轨构成,其中:将所述CCD摄像机、激光器、反射镜安装在箱体内存构成传感器,激光器提供光源,反射镜与传感器成45度角安装,量轨位于传感器下方,整体倒“V”形,具有三个沿长棱,当线光源投射到该轨道上时,在所述三个棱上的成像形成三个拐点A、B、C;场景在传感器上成像后的图象信号送至计算机处理。

8. 根据权利要求7所述的机器人直线轨迹特性测量方法所用测量装置,其特征在于:所述传感器采用视觉传感器。

## 机器人直线轨迹特性测量方法及所用测量装置

### 技术领域

本发明属于机器人技术领域，具体地说是一种机器人直线轨迹特性测量方法及所用测量装置。

### 背景技术

机器人直线轨迹特性是工业机器人的一项重要技术性能指标。直线轨迹的检测，为工业机器人的整体和单元的性能评估、品质特性提供了重要的科学依据。因此，机器人直线轨迹检测技术和装备的研究对提高机器人学的研究水平，促进产业化发展具有重要意义。测量机器人的直线轨迹特性方法可分为接触式测量和非接触式测量两大类。

接触式测量的测量设备直接与机器人末端执行器耦合，从耦合方式上又可分为机械耦合测量和球测量，如 Bryan (参见文献: J. B. Bryan, "A simple method for testing measuring machine and machine tools, Part 1: Principles and applications," Precision Eng., vol. 4, no. 2, pp. 61~69, 1982.) 给出的机械耦合测量方法和 Vira 和 Estler (参见文献: N. Vira and T. Estler, "Use of a contact-type measurement device to detect robots' hand positions," ISA Trans., vol. 29, no. 4, pp. 21-40, 1990.) 描述的球形坐标测量装置。由于这些方法都与机器人手臂产生动态干涉和机械耦合，缺乏安全性和真实性，因此实用性受到了限制。

非接触性测量由于没有接触，因此具有安全、真实的特点。根据测量原理的不同又可分为：基于接近觉传感器 (参见文献: M. Priel, "Evaluating the performance of industrial robots", in Robotics Res., Winter Ann. Mtg. ASME, Dec. 1989, pp.63~67), 摄影测量 (参见文献: Selcom AB, "A complete System for Sophisticated Motion Analysis." Partille, Sweden.), 光学三角测量 (参见文献: J. H. Gilby and G. A. Parker, "Laser tracking system to measure robot arm performance," Sensor Rev., pp. 180~184, Oct. 1982; J. R. R. Mayer and G. A. Parker, "A Portable Instrument for 3D Dynamic Robot Measurements Using Triangulation and Laser Tracking", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10 (4): 504~516), 多边测量 (参见文献: L. G. Roberts, "The Lincoln Wand", MIT Lincoln Lab. Rep., Lexington, MA, June 1966) 和球坐标测量 (参见文献: K. Lau, R. Hocken, and W. Haight "Automatic laser tracking interferometer system for

robot metrology”, Precision Eng., vol. 8, no. 1, pp. 3-8; Jan. 1986) 等。

基于接近觉传感器的测量方法受分辨率的限制其测量空间小，适应性差。摄影测量也受制于分辨率和准确率的限制而无法在所需空间做精密检测。光学三角测量（包括激光跟踪）是目前研究较多的轨迹测量方法，但普遍造价高，使用条件苛刻。其他多边测量和球坐标测量等也都存在实用性不足的问题而受到应用限制。

上述各种机器人轨迹测试方法大多为国外研究开发的。国内 80 年代也研究过接触式轨迹测量系统，但并未实用化。90 年代曾引进过几何激光轨迹测量设备，但价格极高。因此，具有自主知识产权的机器人轨迹检测设备在国内尚属空白。

### 发明内容

为了克服上述不足，本发明的目的是提供一种基于视觉的、造价低廉、实用性强的机器人直线轨迹特性测量方法及所用测量装置。

本发明技术方案是：利用结构光 3D 视觉测量原理，采用线结构光与 CCD 摄像机结合构成传感器，形成结构光反射成象的几何模型，通过传感器在运动中对参考物体连续扫描成象，运用视觉图象处理技术，计算出传感器相对参考物体坐标系的连续位姿关系；当传感器安装在机器人末端关节且沿参考物体坐标系中的一直线运动时，这种连续的位姿关系就反映出机器人末端做直线运动时的轨迹状况，以实现机器人直线轨迹性能的检测；

设定参考物体坐标系 **F**、机器人末端坐标系 **E**、传感器坐标系 **S**，则这三个坐标系之间的位姿关系如公式由公式 (2) 决定：

$$M_{FE} = M_{FS} \cdot M_{SE} \quad (2)$$

所述  $M_{SE}$  为机器人末端坐标系 **E**、传感器坐标系 **S** 之间的位姿关系，采用手眼标定方法得出；所述参考物体坐标系 **F** 和机器人末端坐标系 **E** 之间位姿关系  $M_{FE}$  计算为：根据结构光的 3D 视觉计算机理，当线光源投射到所述轨道上时，在所述三个棱上的成像形成三个拐点 A、B、C，确定这三个拐点在 **F** 和 **S** 下的坐标，可求出 **S** 相对 **F** 的位姿关系  $M_{FS}$ ；其中：三个拐点 A、B、C 在 **S** 下的坐标可由传感器形成的几何模型和成象位置计算出；在 **F** 下的坐标计算由下述方法计算：定义 **F** 在量轨上，平面 DCB' 为量轨的横切面，且与  $Y_F Z_F$  平面平行，**F** 的原点始终定义在点 C 上，平面 ABC 为线结构光投射在量轨上所形成，直线  $\bar{DC}$  的长度由机械加工尺寸确定，直线  $\bar{AC}$  的长度可以根据 A、C 两点在 **S** 坐标系下的坐标求出，则点 A 在 **F** 下的坐标  $A_F (X_{AF}, Y_{AF}, Z_{AF})$  为：

$$\begin{cases} X_{AF} = \|\bar{AD}\| = \|\bar{AC}\| \sin \arccos(\|\bar{DC}\| / \|\bar{AC}\|) \\ Y_{AF} = -h \\ Z_{AF} = h(\|\bar{BC}\|/2) \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $h$  为量轨棱高; 同理, 可得到点  $B$  在  $F$  下的坐标  $B_F(X_{BF}, Y_{BF}, Z_{BF})$  为:

$$\begin{cases} X_{BF} = \pm \|\bar{B'C}\| \sin \arccos(\|\bar{BC}\| / \|\bar{B'C}\|) \\ Y_{BF} = 0 \\ Z_{BF} = \|\bar{BC}\| \end{cases} \quad (4)$$

根据结构光投射的角度, 定义  $X_{BF}$  的正负; 且指定  $S$  沿量轨长轴运动时, 各轴方向不变; 所述  $M_{FS}$  通过测量计算拐点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  在量轨模型  $F$  和传感器  $S$  下的坐标求出后求解  $S$  与  $F$  间的位姿变换关系  $M_{FS}$ ,  $M_{FS}$  与三个拐点的表达式为 (5): 再利用矩阵求解法可解出  $M_{FS}$ ;

$$(A_F, B_F, C_F) = M_{FS}(A_S, B_S, C_S) \quad (5)$$

所述机器人直线轨迹特性测量方法所用测量装置, 由传感器(包含 CCD 摄像机、激光器、反射镜)、量轨构成, 其中: 将所述 CCD 摄像机、激光器、反射镜安装在箱体内存构传感器, 激光器提供光源, 反射镜与传感器成 45 度角安装, 量轨位于传感器下方, 整体倒“V”形, 具有三个沿长棱, 当线光源投射到该轨道上时, 在所述三个棱上的成像形成三个拐点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ ; 场景在传感器上成象后的图象信号送至计算机处理; 所述传感器采用视觉传感器。

本发明的优点在于:

1. 本发明为基于视觉的、造价低廉、实用的非接触式机器人直线轨迹测量系统, 它利用结构光几何成像原理和视觉图象处理技术, 通过实时轨迹图象记录, 离线处理方式, 实现了机器人直线轨迹与重复性测量。

2. 使用方便、低成本, 高性能。本发明采用结构光视觉测量方式, 对设备和使用条件无需苛刻的要求, 使机器人直线轨迹性能检测得以在低成本, 使用简便的情况下实现, 满足了我国现阶段机器人学研究和产业化的需求, 且解决了机器人轨迹性能测量在机器人研究与开发中的一个难题。

3. 实用性强。本发明位置测量原理合理, 技术实用, 具有重要的应用价值, 可以应用于类似非接触 3D 位置(或位姿)检测与计量场合。

#### 附图说明

图 1 为本发明测量装置结构示意图。

图 2 为本发明测量原理示意图。

图 3 为本发明一个实施例中一组静态测试轨迹曲线。

图 4 为本发明一个实施例在速度为 20mm/s 时的 Y 方向轨迹曲线。

### 具体实施方式

下面根据附图结合具体实施例对本发明作进一步的说明。

#### 实施例 1

利用结构光 3D 视觉测量原理，采用线结构光与 CCD 摄像机结合构成传感器，形成结构光反射成象的几何模型，通过传感器在运动中对参考物体连续扫描成象，运用视觉图象处理技术，计算出传感器相对参考物体坐标系的连续位姿关系；当传感器安装在机器人末端关节且沿参考物体坐标系中的一直线运动时，这种连续的位姿关系就反映出机器人末端做直线运动时的轨迹状况，以实现机器人直线轨迹性能的检测。

如图 1 所示，测量装置由传感器（CCD 摄像机、激光器、反射镜和安装支架）、量轨构成，其中：通过支架将所述 CCD 摄像机、激光器、反射镜安装在箱体内，激光器提供光源，反射镜与传感器成 45 度角安装，量轨位于反射镜下方，整体倒“V”形，具有三个沿长棱，当线光源投射到该轨道上时，在所述三个棱上的成像形成三个拐点；场景在传感器上成象后的数据信号送至计算机；其中所述传感器采用视觉传感器。

如图 1、2 所示，设定参考物体坐标系 **F**、机器人末端坐标系 **E**、传感器坐标系 **S**，则这三个坐标系之间的位姿关系如公式由公式（2）决定：

$$M_{FE} = M_{FS} \cdot M_{SE} \quad (2)$$

其中：由于传感器（坐标系 **S**）与机器人末端（坐标系 **E**）固定连接，所述机器人末端坐标系 **E**、传感器坐标系 **S** 之间的位姿关系  $M_{SE}$  可采用一般手眼方法标定得出；传感器坐标系 **S** 和参考坐标系 **F** 位姿关系  $M_{FS}$  的确定根据结构光的 3D 信息计算机理，当线光源投射到所述轨道上时，在所述三个棱上的成像形成三个拐点 A、B、C，由三个拐点在 **F** 和 **S** 下的坐标求出 **S** 相对 **F** 的位姿关系  $M_{FS}$ ；最后由已知  $M_{SE}$ 、 $M_{FS}$  求出  $M_{FE}$ ；其中：三个拐点 A、B、C 在 **S** 下的坐标可由传感器形成的几何模型和成象位置计算出；在 **F** 下的坐标计算由下述方法计算，矩阵  $M_{FE}$  的定义如下，设空间点 **P** 在坐标系 **F** 和 **E** 下的坐标分别为  $(x_f, y_f, z_f), (x_e, y_e, z_e)$ ，则有：

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = M_{FE} \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{FE} & T_{FE} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{fe00} & r_{fe01} & r_{fe02} & t_{fe0} \\ r_{fe10} & r_{fe11} & r_{fe12} & t_{fe1} \\ r_{fe20} & r_{fe21} & r_{fe22} & t_{fe2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中，矩阵  $M_{FE}$  中的  $R_{FE}$  旋转矩阵和  $T_{FE}$  位置矢量，反映了 **F** 和 **E** 两个坐标系间的旋转和位置关系，从  $T_{FE}$  和  $R_{FE}$  中可得出末端执行器 **E** 相对于参

坐标系  $F$  间的位置  $(E_x, E_y, E_z)$  和姿态角  $(\alpha, \beta, \gamma)$ ; 当  $E$  相对  $F$  运动时可以得到连续的  $M_{FE}$ , 则  $E$  在  $F$  中相应的运动轨迹就可以描述出来。

定义  $F$  在量轨上, 且平面  $DCB'$  与  $Y_F Z_F$  平面平行, 当指定  $S$  沿量轨长轴运动时, 将  $F$  的原点始终定义在点  $C$  上, 且各轴方向不变; 平面  $DCB'$  为量轨的横切面, 平面  $ABC$  为结构激光投射在量轨上射线形成的, 直线  $\bar{D}\bar{C}$  的长度由机械加工尺寸确定, 拐点在图象中的坐标确定之后, 直线  $\bar{A}\bar{C}$  的长度可以根据  $A, C$  在  $S$  坐标系下的坐标求出, 则点  $A$  在  $F$  下的坐标  $A_F (X_{AF}, Y_{AF}, Z_{AF})$  为:

$$\begin{cases} X_{AF} = \|\bar{A}\bar{D}\| = \|\bar{A}\bar{C}\| \sin \arccos(\|\bar{D}\bar{C}\| / \|\bar{A}\bar{C}\|) \\ Y_{AF} = -h \\ Z_{AF} = h(\|\bar{B}\bar{C}\|/2) \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $h$  为量轨棱高; 同理, 可得到点  $B$  在  $F$  下的坐标  $B_F (X_{BF}, Y_{BF}, Z_{BF})$  为:

$$\begin{cases} X_{BF} = \pm \|\bar{B}'\bar{C}\| \sin \arccos(\|\bar{B}\bar{C}\| / \|\bar{B}'\bar{C}\|) \\ Y_{BF} = 0 \\ Z_{BF} = \|\bar{B}\bar{C}\| \end{cases} \quad (4)$$

根据激光投射的角度, 定义  $X_{BF}$  的正负; 且指定  $S$  沿量轨长轴运动时, 各轴方向不变。

通过确定的三个拐点  $A, B, C$  在  $F$  和  $S$  下的坐标, 求出  $S$  相对  $F$  的位姿关系  $M_{FS}$ :

当拐点  $A, B, C$  按上述方法确定之后,  $S$  与  $F$  间的位姿关系可以通过旋动理论 (参见文献: 董再励, 王建刚, 徐心平, “一种基于立体视觉的多视点建模方法”, 《中国图象图形学报》, Vol.2, No.7, 1997, pp461-463) 所介绍的方法计算出来, 其  $M_{FS}$  求解使用关系公式为:

$$(A_F, B_F, C_F) = M_{FS}(A_S, B_S, C_S) \quad (5)$$

这里需要指出的是, 按此机理,  $X_F$  方向的位移量是没有意义的, 因为指定机器人的运动方向应与其基本平行。将这个连续位姿关系通过规定的描述方式进行描述, 就得到了直线轨迹。这个轨迹直接反映了机器人系统的直线运动性能。

由于机器人带动传感器沿量轨长度方向做直线运动检测的速度是不定的, 因此采样速率希望高一些, 以满足在检测机器人高速运动时的直线运动状态。本发明的工作方式是在线采样, 离线处理。即按给定运动速度设定采样间隔以保证最大采样次数, 得到一组图象序列。运动结束后, 对每幅图象进行处理和位姿计算, 然后将各时刻的位姿关系连续, 就得到传感

器相对于量轨的运动轨迹。

测试结果：主控计算机采用工业 PC 机，CPU 为 PII500，内存 256M，并配有：图象采集卡和与机器人控制器通讯的 I/O 接口卡，测量传感器安装在机器人手臂末端，量轨可根据测量轨迹的需要放置。为提高采样频率，逼真地反映机器人直线运动轨迹，本发明采用在线图象采样，离线数据处理的方式工作。采样数和采样频率可以根据机器人的运动速度自动调整，采样数  $\leq 490$ /单次，采样频率  $\leq 25$  幅/秒。本实施例一组静态测量的测量条件和统计结果见表 1。

表 1 静态测量的测量条件和统计结果

测试条件	窗口大小	时间间隔	采样帧数
	512×512 指标	40ms 均方根误差	250 最大误差
测试结果	位置 (mm)	0.01	0.06
	绕 X 轴转角 (°)	0.03	0.10
	绕 Y 轴转角 (°)	0.03	0.19

由图 3 是该装置的直线轨迹精度测量结果。图 4 是机器人速度为 2mm/s 的轨迹测量结果。实验可知，该测量系统的位置检测精度满足了对工业机器人直线轨迹的检测要求；实际对机器人在 0.2mm/s，11mm/s，20mm/s，40mm/s，60mm/s 速度下进行了实际测量。所得结果均反映了机器人运动轨迹的真实状况，反映了机器人的运动轨迹和随时间变化的规律，实现了定性检测机器人直线运动状态的目标。

本发明主要技术指标：

1. 每次轨迹测量过程采样点  $\leq 490$  次，可根据需要设定。
2. 采样频率达 25 幅/秒。
3. 测量维数：5（2 位置量，3 旋转量）
4. 特征点三维计算精度，平均误差  $\leq 0.025\text{mm}$ ，最大误差  $\leq 0.15\text{mm}$ 。
5. 提供用户自标定功能，因而可以根据实际需要改变摄像和激光的参数。
6. 图象采集方式可自动或手动，即可均匀采样，又可随机采样。
7. 可按标准进行轨迹性能评估。

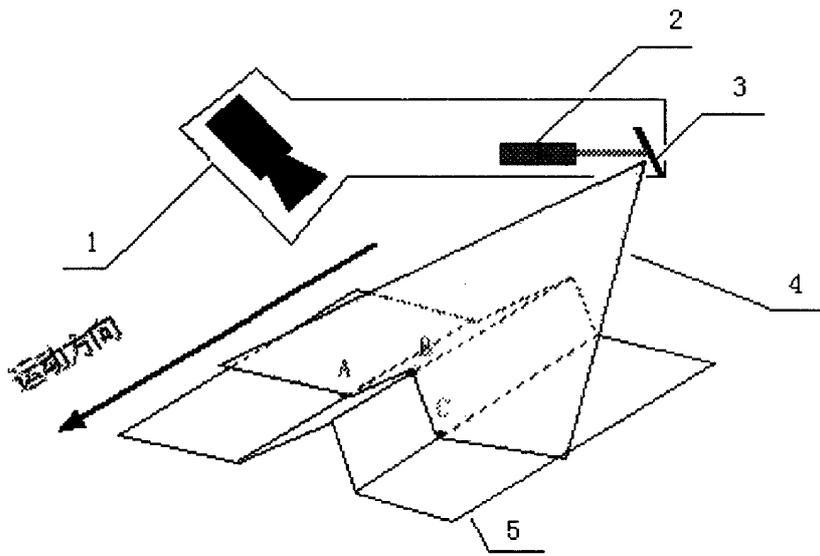


图 1

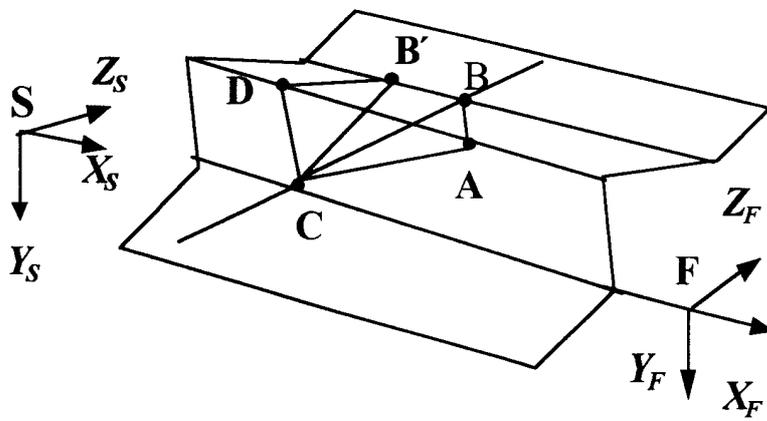


图 2

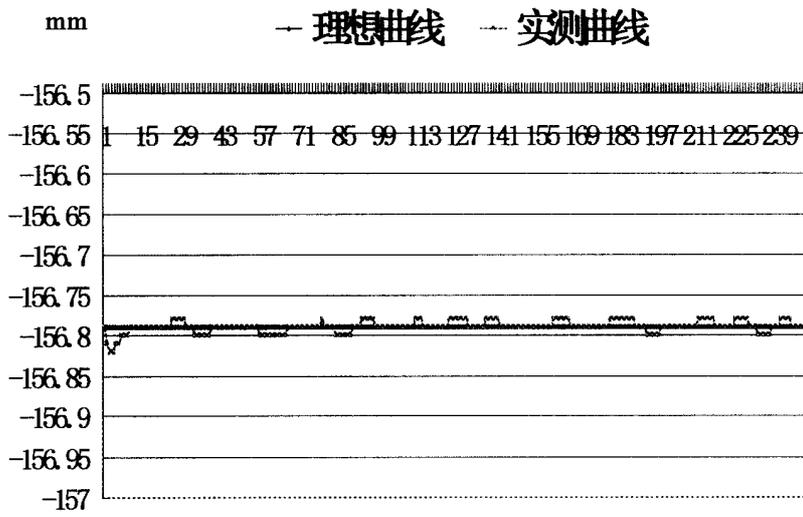


图 3

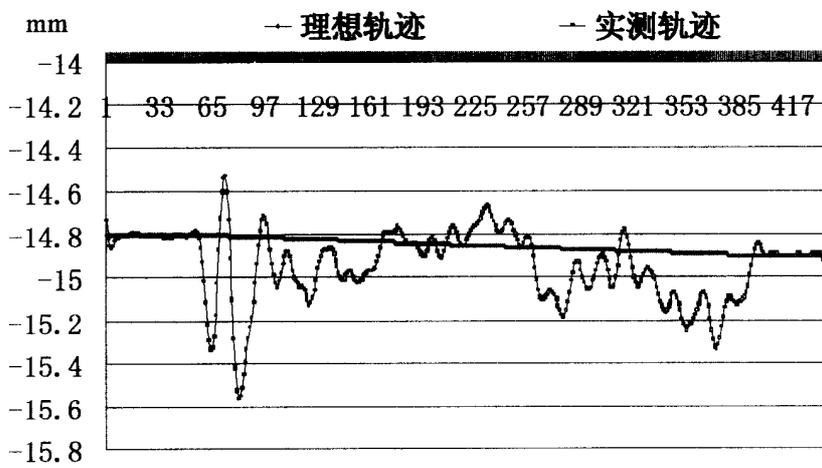


图 4