

T/CSOE

中国光学工程学会团体标准

T/CSOE 0011—2025

基于三维视觉测量系统的毛坯件数控加工 定位方法

NC Machining Localization Method for Blank Parts Based on 3D Vision
Measurement System

（报批稿）

— XX — XX 发布

XXXX — XX — XX 实施

中国光学工程学会 发布

目 次

前 言 II

1 范围 3

2 规范性引用文件 3

3 术语和定义 3

4 定位原理 3

5 定位设备 4

6 环境条件 4

7 定位步骤 4

 7.1 定位准备 4

 7.2 视觉测量坐标系与机床坐标系转换标定 5

 7.3 零件模型定位 6

8 测量报告 7

附 录 A （资料性） 标定数据记录表 8

 A.1 多自由度分离标定法轴向量数据见表 A.1 8

 A.2 多自由度分离标定法原点标定数据见表 A.2 8

 A.3 多自由度联合标定法靶标球球心数据见表 A.3 8

附 录 B （资料性） 转换关系数据 1

附 录 C （资料性） 应用示例 2

 C.1 视觉测量坐标系与机床坐标系转换标定 2

 C.2 零件模型坐标系与视觉测量坐标系转换标定 2

 C.3 零件模型定位 3

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国光学工程学会提出并归口。

本文件起草单位：北京航空航天大学、成都飞机工业（集团）有限责任公司、北京航天计量测试技术研究所、北京长城计量测试技术研究所、泰西（北京）精密技术有限公司、北京唯实宏绘空间信息科技有限公司等。

本文件主要起草人：赵慧洁、王继虎、李本军、李旭东、鲍晨兴、姜宏志、路全忠、聂海平、张海存、杨永军、许彦龙。

基于三维视觉测量系统的毛坯件数控加工定位方法

1 范围

本文件规定了基于三维视觉测量系统的毛坯件数控加工定位方法的定位原理、定位设备、环境条件和定位步骤等。

本文件适用于在数控加工设备对毛坯件机械加工前,采用三维视觉测量系统实现毛坯件定位的方法。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 2259 机床夹具零件及部件技术要求

JB/T 3051 数控机床坐标和运动方向的命名

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 1951 基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范

3 术语和定义

GB/T 2259、JB/T 3051、JJF1001以及JJF1951界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

三维视觉测量系统 three-dimensional visual measurement system

基于光学成像和计算机视觉等技术,重建被测对象表面点云的非接触三维测量系统。

3.2

视觉测量坐标系 visual measurement coordinate system

建立在三维视觉测量系统上的测量坐标系。

3.3

机床坐标系 machine coordinate system

以机床原点为坐标系原点并遵循右手笛卡尔直角坐标系建立的由X、Y、Z轴组成的直角坐标系。

3.4

零件模型坐标系 part model coordinate system

在计算机辅助设计软件中定义的、用于描述零件几何形状和设计基准的固有空间基准坐标系。

3.5

转换矩阵 transformation matrix

用于描述不同三维空间直角坐标系之间转换关系的 4×4 矩阵。

4 定位原理

铸件、锻件和3D打印件等毛坯,通过数控加工去除多余材料以获取最终成品。而数控加工的首要前提是在加工前精准定位毛坯件在机床坐标系中的位置和姿态。本文件规定了基于三维视觉测量系统的毛坯件数控加工定位方法。该方法的定位原理是,采用三维视觉测量系统获取毛坯件表面的三维点云数据,并结合标定出的视觉测量坐标系与机床坐标系之间的转换矩阵,将毛坯件三维数据转换至机床坐标系,从而确定毛坯件在机床坐标系中的位置和姿态。

如图1所示,毛坯件通过三维视觉测量系统测量,获得毛坯件点云 C_{ON} ,并与毛坯件在零件模型坐标系下点云 C_{OFF} 进行配准,得到零件模型坐标系与视觉测量坐标系转换矩阵 H_1 。通过视觉测量坐标系与机床坐标系转换标定得到视觉测量坐标系与机床坐标系之间的转换矩阵 H_2 ;根据 H_1 与 H_2 ,计算得

到零件模型坐标系与机床坐标系之间的转换矩阵 H_3 ，实现零件定位孔、定位面等特征在机床坐标系下位姿表达。

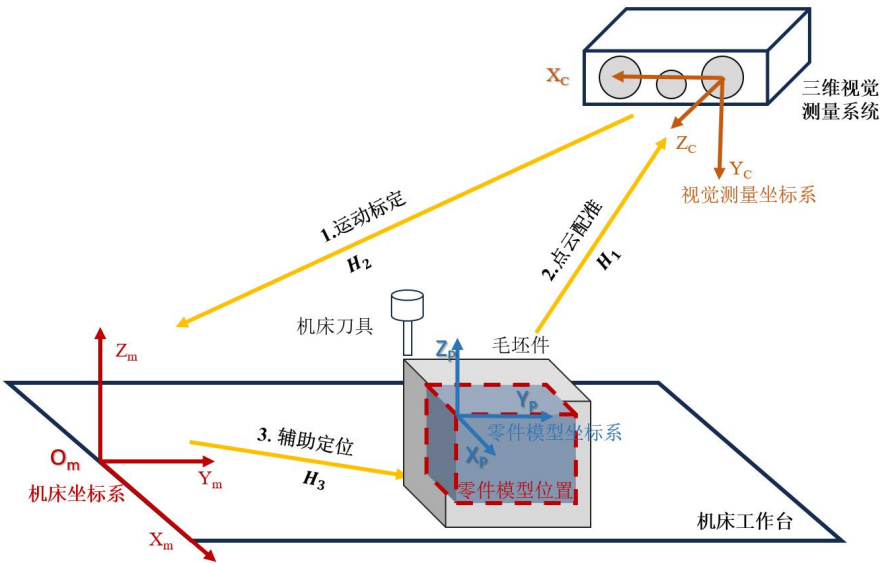


图 1 数控毛坯件加工三维视觉测量辅助定位原理图

5 定位设备

定位设备应符合下列规定：

- a) 三维视觉测量系统：由相机、结构光投射器等组成，能够重建被测对象表面三维点云。
- b) 轴向标定靶标：粘贴有数量不少于 3 个的非共线标志点的平面靶标；
- c) 原点标定靶球：材质为白色漫反射表面哑光陶瓷；
- d) 固定架：稳固固定三维视觉测量系统的固定架；
- e) 接触式探头：安装到机床主轴上的标准接触式探针；
- f) 显示器：刷新率优于 120Hz；
- g) 主机：支持与数控机床和三维视觉测量系统的数据接口互连、支持图像显示；
- h) 数据处理软件，应具备下列功能：
 - 1) 具有图像采集、三维重建等；
 - 2) 具备视觉测量坐标系与机床坐标系之间转换关系的标定功能；
 - 3) 具备三维点云和零件模型读取和保存等功能；
 - 4) 可选具备加工余量分析功能。

6 环境条件

数控加工车间环境温度宜为10℃~35℃，相对湿度宜小于75%。

7 定位步骤

7.1 定位准备

测量毛坯件点云 C_{OFF} ，将三维视觉测量系统安装在机床工作台或主轴上，调整工作距离及视场，并将毛坯件放置到视场中心附近。

7.2 视觉测量坐标系与机床坐标系转换标定

7.2.1 多自由度分离标定法

多自由度分离标定法是指分别标定出机床坐标系的X轴、Y轴、Z轴和坐标原点在视觉测量坐标系下对应向量或坐标的方法。

- 标定机床坐标系的 X 轴在视觉测量坐标系下的向量 n_x 。如图 2 所示，将轴向标定靶标安装在机床上，调整机床使轴向标定靶标位于三维视觉测量系统视场中。控制机床沿机床坐标系 X 轴的正方向移动，三维视觉测量系统分别重建每个轴运动前后位置标定靶标上的靶标点三维坐标，计算得到平移向量 n_x 。
- 标定机床坐标系的 Y 轴在视觉测量坐标系下的向量 n_y 。控制机床沿机床坐标系的 Y 轴的正方向移动，同步步骤 a)，计算得到 n_y 。
- 计算机床坐标系的 Z 轴在视觉测量坐标系下的向量 n_z ，计算公式如下：

$$n_z = n_x \times n_y \cdots \cdots (1)$$

- 获得机床坐标系到视觉测量坐标系之间的旋转矩阵 R ，计算公式如下：

$$R = [n_x, n_y, n_z] \cdots \cdots (2)$$

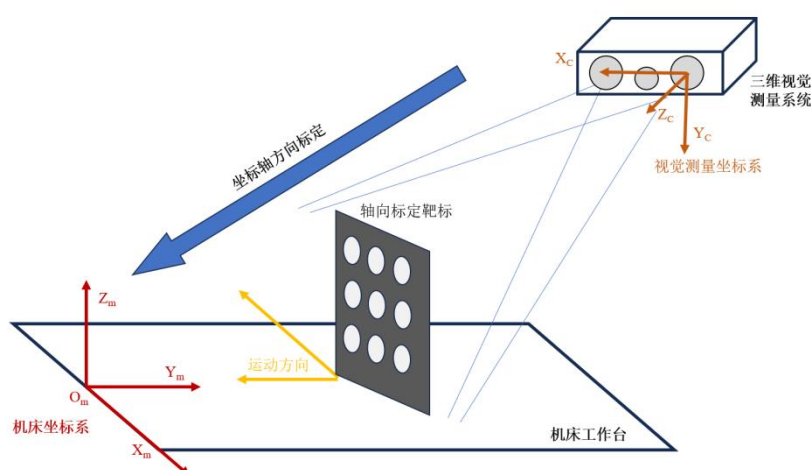


图 2 坐标轴方向标定测量图

- 如图 3 所示，将原点标定靶球固定在机床上，使用安装于机床主轴上的接触测头对原点标定靶球多点测量，拟合出球心在机床坐标系下的坐标 x_1 。

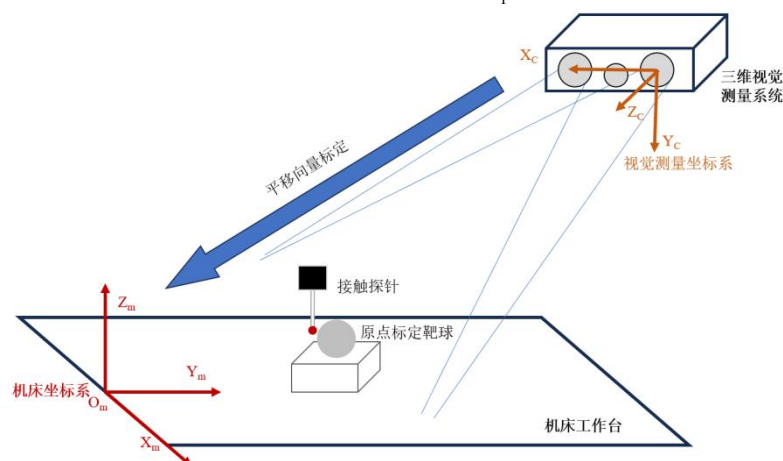


图 3 坐标轴平移向量标定测量图

- f) 用三维视觉测量系统测得原点标定靶球表面点云并拟合得到球心坐标 x_2 ，机床坐标系与视觉测量坐标系之间的平移向量为 t ：

$$t = x_1 - R^{-1}x_2 \dots\dots\dots (3)$$

$$H_2 = \begin{pmatrix} R^{-1} & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

H_2 ——视觉测量坐标系与机床坐标系之间的转换矩阵。

7.2.2 多自由度联合标定法

多自由度联合标定法是指将非共线的3个靶标球的球心坐标作为视觉测量系统与机床坐标系的公共点，从而计算这两个坐标系之间转换矩阵的方法。

如图4所示，将三个标准球非共线分布在毛坯件周围，不超出三维视觉测量系统视场，通过三维视觉测量系统测量得到三个标准球在视觉测量坐标系下坐标。通过机床的接触探针针对三个标准球进行多点测量，拟合球心在机床坐标系下的坐标位置，借用标准球在不同坐标系下的坐标标定视觉测量坐标系到机床坐标系的转换关系 H_2 。

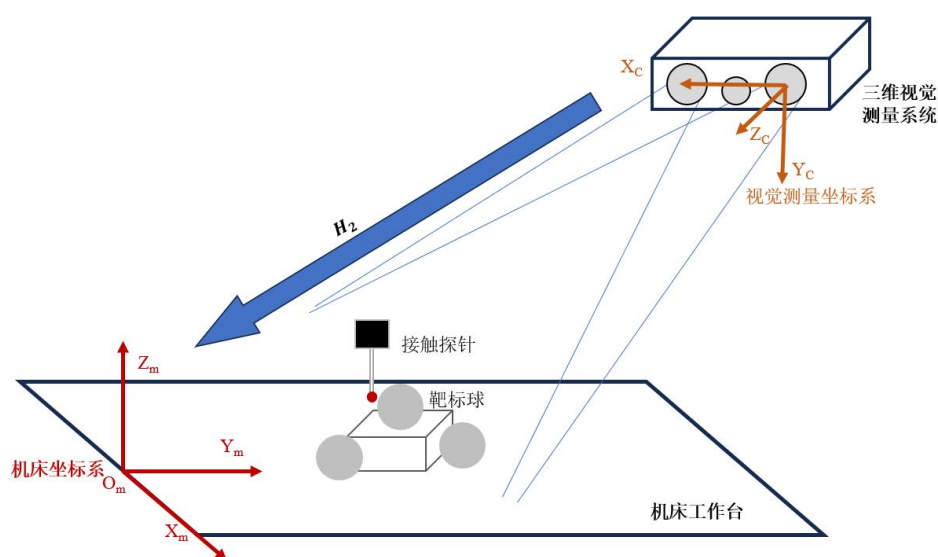


图4 标准球标定方法测量图

7.3 零件模型定位

零件模型定位步骤如下：

- 通过三维视觉测量系统，重建出完整毛坯件三维点云，按照加工余量优化准则，将其配准至零件模型，得到毛坯件三维点云 C_{OFF} ；
- 在数控机床上，采用三维视觉测量系统，测量并得到毛坯件三维点云 C_{ON} ；
- 通过将点云 C_{OFF} 配准至点云 C_{ON} ，计算得到零件模型坐标系到视觉测量坐标系的转换矩阵 H_1 ，如图5所示。

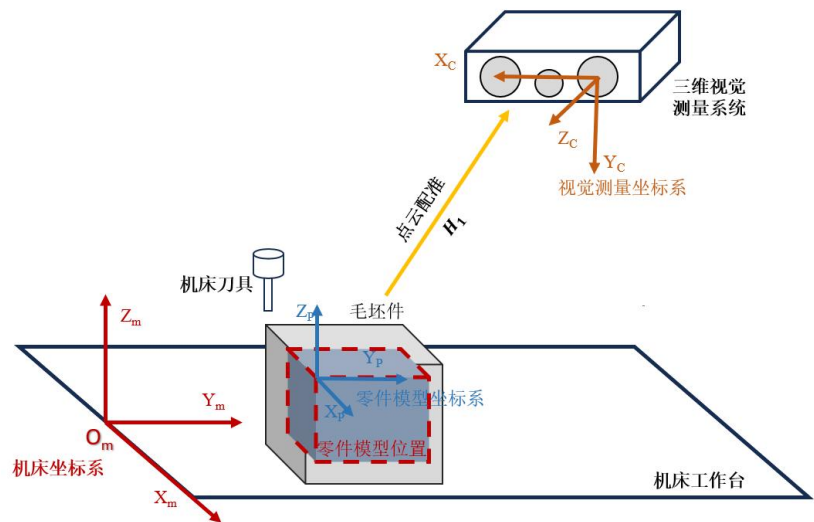


图 5 毛坯件模拟定位图

d) 如图 6 所示，零件模型坐标系到机床坐标系的转换矩阵 H_3 ：

$$H_3 = H_1 H_2 \dots \dots \dots (1)$$

e) 空间点在零件模型坐标系下齐次坐标 x 转换到在机床坐标系下的齐次坐标 y ，按下式计算：

$$y = H_3 x \dots \dots \dots (2)$$

式中：

y ——零件模型特征在机床坐标系下的齐次坐标；

x ——零件模型特征在零件模型坐标系下的齐次坐标。

f) 按照式（6），得到零件模型特征在机床坐标系下的坐标位置，完成定位过程。

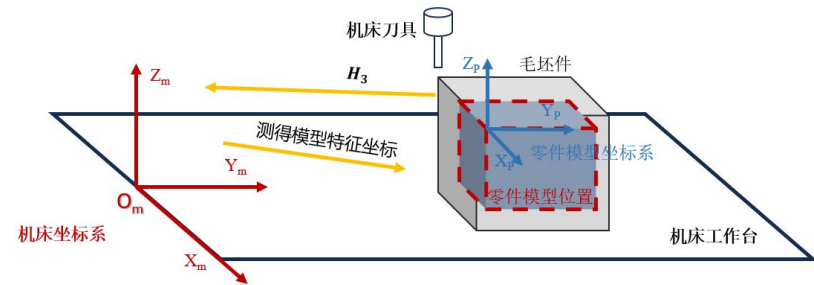


图 6 视觉系统辅助装夹与定位图

8 测量报告

测量报告宜包括下列内容：

a) 测量基本信息，宜包括下列内容：

- 1) 测量时间：
- 2) 测量地点：
- 3) 环境温度：
- 4) 相对湿度：

b) 测量结果，记录格式见附录 A 与附录 B。

附 录 A
(资料性)
标定数据记录表

A. 1 多自由度分离标定法轴向量数据见表 A. 1

表 A. 1 多自由度分离标定法轴向量数据记录表

坐标轴	机床坐标系	视觉测量坐标系
X 轴方向		
Y 轴方向		
Z 轴方向		

A. 2 多自由度分离标定法原点标定数据见表 A. 2

表 A. 2 多自由度分离标定法靶标球球心拟合数据记录表

机床坐标系	视觉测量坐标系

A. 3 多自由度联合标定法靶标球球心数据见表 A. 3

表 A. 3 多自由度联合标定法靶标球球心拟合数据记录表

编号	机床坐标系	视觉测量坐标系
1		
2		
3		

附 录 B
(资料性)
转换关系数据

坐标系转换	矩阵
机床坐标系与工件坐标系转换 关系数据 H_1	
视觉测量坐标系与机床坐标系 转换关系 H_2	
零件模型坐标系到工件坐标系 的转换关系 H_3	

附录 C

(资料性)

应用示例

C.1 视觉测量坐标系与机床坐标系转换标定

将轴向标定靶标安装在机床上,调整机床使轴向标定靶标位于三维视觉测量系统视场中。控制机床分别沿机床坐标系的X、Y轴平移靶标,三维视觉测量系统分别重建每个轴运动前后位置,分别计算得到两个轴的平移向量 $\mathbf{n}_x$ 和 $\mathbf{n}_y$:

$$\mathbf{n}_x = (0.999248, 0.038423, -0.005125) \dots\dots\dots (C.1)$$

$$\mathbf{n}_y = (0.038554, -0.999256, 0.000209) \dots\dots\dots (C.2)$$

叉乘两个向量得到机床Z轴方向:

$$\mathbf{n}_z = (-0.005112, -0.000406, -0.999993) \dots\dots\dots (C.3)$$

视觉测量坐标系下机床坐标轴方向向量,构成机床坐标系到视觉测量坐标系之间的旋转矩阵 $\mathbf{R}$:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0.999248 & 0.038423 & -0.005125 \\ 0.038554 & -0.999256 & 0.000209 \\ -0.005112 & -0.000406 & -0.999993 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (C.4)$$

将原点标定靶标固定在机床上,使用安装于机床主轴上的接触测头对原点标定靶球多点测量,拟合出球心在机床坐标系下的坐标 $\mathbf{x}_1$:

$$\mathbf{x}_1 = (45.234, -20.830, 365.792) \dots\dots\dots (C.5)$$

用三维视觉测量系统测得原点标定靶球表面点云并拟合得到原点标定靶球球心坐标 $\mathbf{x}_2$:

$$\mathbf{x}_2 = (-62.993, -20.992, 363.126) \dots\dots\dots (C.6)$$

机床坐标系与视觉测量坐标系之间的平移向量为 $\mathbf{t}$:

$$\mathbf{t} = (110.840, -39.161, 728.593) \dots\dots\dots (C.7)$$

记录转换矩阵 $\mathbf{H}_2$:

$$\mathbf{H}_2 = \begin{pmatrix} 0.999248 & 0.038423 & -0.005125 & 110.840 \\ 0.038554 & -0.999256 & 0.000209 & -39.161 \\ -0.005112 & -0.000406 & -0.999993 & 728.593 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (C.8)$$

C.2 零件模型坐标系与视觉测量坐标系转换标定

设毛坯件是边长为100mm的正方体,通过三维视觉测量系统测量得到毛坯件特征点在视觉测量坐标系下点云 $\mathbf{C}_{ON}$ 为:

$$\mathbf{C}_{ON} = \begin{pmatrix} 500.000 & 500.000 & 1000.000 \\ 586.603 & 550.000 & 1000.000 \\ 536.603 & 550.000 & 1000.000 \\ 450.000 & 586.603 & 1000.000 \\ 500.000 & 500.000 & 1100.000 \\ 586.603 & 550.000 & 1100.000 \\ 536.603 & 550.000 & 1100.000 \\ 450.000 & 586.603 & 1100.000 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (C.9)$$

得到离线测量的毛坯件点云，按照加工余量优化准则，进行余量优化，特征点位置在模型坐标系下的点云 C_{OFF} ：

$$C_{\text{OFF}} = \begin{pmatrix} -50.000 & -50.000 & -50.000 \\ 50.000 & -50.000 & -50.000 \\ 50.000 & 50.000 & -50.000 \\ -50.000 & 50.000 & -50.000 \\ -50.000 & -50.000 & 50.000 \\ 50.000 & -50.000 & 50.000 \\ 50.000 & 50.000 & 50.000 \\ -50.000 & 50.000 & 50.000 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (C.10)$$

通过将点云 C_{OFF} 配准至点云 C_{ON} ，计算得到零件模型坐标系到视觉测量坐标系的转换矩阵 H_1 ：

$$H_1 = \begin{pmatrix} 0.866025 & -0.500000 & 0.000000 & 500.247 \\ 0.500000 & 0.866025 & 0.000000 & 500.247 \\ 0.000000 & 0.000000 & 1.000000 & 1000.247 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (C.11)$$

C.3 零件模型定位

零件模型坐标系到机床坐标系的转换矩阵 H_3 ：

$$H_3 = \begin{pmatrix} 0.846088 & 0.533018 & -0.004223 & 615.826 \\ 0.533018 & 0.846088 & -0.004223 & 615.826 \\ -0.005131 & 0.000209 & -0.999992 & 1728.839 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (C.12)$$

空间点在零件模型坐标系下齐次坐标 x 转换到在机床坐标系下的齐次坐标 y ，有如下关系：

$$y = \begin{pmatrix} 0.846088 & 0.533018 & -0.004223 & 615.826 \\ 0.533018 & 0.846088 & -0.004223 & 615.826 \\ -0.005131 & 0.000209 & -0.999992 & 1728.839 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} x \dots\dots\dots (C.13)$$

对于零件模型中的定位孔齐次坐标 x_3 及其齐次法向量为 n_L 待加工平面 L ：

$$x_3 = (851.772, 1123.957, 361.063, 1)^T \dots\dots\dots (C.14)$$

$$n_L = (0.123456, -0.678901, 0.724567, 1)^T \dots\dots\dots (C.15)$$

在机床坐标系下的定位孔齐次坐标 y_3 和待加工平面法向量 m_L 由公式（6）计算得出：

$$y_3 = (1933.301, 2019.301, 1363.644, 1)^T \dots\dots\dots (C.16)$$

$$m_L = (615.565, 615.315, 1728.113, 1)^T \dots\dots\dots (C.17)$$

至此，完成三维视觉测量系统下的毛坯件的定位过程。