

## 摘 要

双目立体视觉是计算机视觉的一个重要研究分支，它通过计算同一场景下空间点在两幅图像上的视差来恢复场景的三维深度信息。与传统的深度测量方式相比，它具有非接触性和被动性两个最大的优点。这些优点使其在工业检测、航空航天、机器人导航及战场监视等领域得到了广泛的运用。

近年来，双目立体视觉方法虽然取得较大进展，但其中有些问题仍有待更好的解决，比如摄像机的标定精度和立体匹配的准确性问题，还需要研究人员不断提出新的解决办法。本文针对双目立体视觉中的摄像机标定、立体匹配、立体测量误差和精度分析等方面重点展开了理论与实现技术的研究。主要工作和创新点如下：

1. 为了提高摄像机的标定精度，提出一种对初始角点有限邻域进行直线拟合的角点提取算法。算法以初步提取的 Harris 角点为中心，在其有限邻域范围内对棋盘格边缘进行直线拟合，将直线交点作为最终角点。利用提取的角点在平面标定法下对立体视觉系统进行标定，获得了较高的标定精度，证明了该角点提取方法的有效性。

2. 为了较好的平衡局部立体匹配算法的准确度和速度，提出了一种基于种子点传播的快速立体匹配算法。算法采用联合匹配代价度量左右图像差异，利用图像边缘信息辅助构建动态匹配窗口，以削弱固定窗的不利影响来获取高质量的初始视差图，然后通过左右一致检验和区域特性筛选出种子点，在多种约束下进行种子点传播，最后采用区域投票优化视差图。算法在测试图对的大部分区域获得了较高的匹配精度，具有一定的实用价值。

3. 针对半全局算法中存在的路径规划不完全问题，提出一种基于视差平面约束的半全局立体匹配算法。算法采用 FAST 特征点和 ORB 描述子相结合的方式对左右视图匹配以获取稀疏视差图，利用图像分割对稀疏视差点聚类并将其传播给同一分割区域内的其它点；然后对分割区域内的可信视差点进行平面拟合，将平面拟合视差和初始视差的差值作为像素点的匹配代价约束，最后利用半全局方法求取能量方程最优解。实验表明算法在保持高效性的同时能够较好的处理弱纹理和结构重复区域，对于遮挡和深度不连续区域也能够获得较为稳定的匹配结果。

4. 从理论上详细分析了双目立体视觉系统中影响测量精度的一些因素，主要对摄像机像元量化误差、结构参数误差与距离分辨率精度等三个方面展开了理论推导，并给出了相应的结论。最后在不同的场景下测试了本文的两个算法，通过理论推导和实验数据分析相结合的方法，以期对双目立体视觉测距平台的构建提出一些可供参考的建议。

**关键词：**立体视觉，摄像机标定，局部匹配，种子点传播，平面约束

## ABSTRACT

Binocular stereovision is an important research branch of computer vision, which can restore the three-dimensional depth information of the scene by computing the disparity of space points in two images of the same scene. Compared with the traditional depth measurement, it has two outstanding advantages, non-contact and passiveness and it has been widely used in industrial inspection, aerospace, robotics navigation, battlefield surveillance and other fields with these excellent features.

In recent years, binocular stereovision method has got greater progress. However, there are still many problems to be solved, such as camera calibration accuracy and stereo matching accuracy problems, which need the researchers to propose new solutions continuously. The paper carried out theory and technical implementation research on the camera calibration, stereo matching method, and stereovision measurement error and accuracy analysis for the binocular stereovision. The main work and innovations are as follows:

1. In order to improve the accuracy of camera calibration, the corner extraction algorithm based on linear fitting of the initial corner's limited neighborhood is proposed. Harris operator is employed to extract the checkerboard corners preliminarily, the extracted checkerboard edge is implemented the linear fitting within the certain scope of the initial harris corners and the intersection of the two fitting lines is the final corner. The extracted corners are used to calibrate the stereo vision system with plane calibration method, which get higher calibration accuracy, the corner extraction method is proved to be effective.

2. In order to get a better balance both in time and accuracy of local stereo matching algorithm. A fast stereo matching algorithm based on seeds point propagation is presented. The joint matching cost is employed to measure the difference between left and right image in the algorithm, use the image edge information to help build the dynamic matching window, which can weaken the adverse effects of the fixed window and obtain high quality initial disparity map. After the seeds point selection through the left

and right consistency check and regional characteristics, the seeds points are propagated with a variety of constraints. At last, the disparity map is refined with the regional vote. The algorithm can get a higher accuracy on most region of test images and has certain practical value.

3. The semi-global stereo matching algorithm based on the disparity planar constraints is put forward according to incomplete of the optimal path in the semi-global algorithm. We establish sparse correspondences by extracting FAST feature points and ORB descriptor in both images. The sparse disparity points are clustered with the image segmentation and propagate to other points in the same segmented region. The reliable disparity points of the segmented region are carried out the planar fitting and the difference between the plane fitting disparity and the initial disparity is added to the pixel matching cost as a constraint. Then, the optimal solution to the energy equation is obtained with the semi-global method. Experiments show that the algorithm can work well in the region with textureless and repetitive structure and it can also get stable matching results in the occlusion and depth discontinuity region while maintaining efficiency.

4. Some factors affecting the measurement accuracy in the binocular stereovision system are analyzed theoretically in detail. The theoretical derivation for the three aspects of the camera pixel quantization error, structural parameters error, and range resolution accuracy are launched and the corresponding conclusions are drawn. The two algorithms are tested in different scenes. At last, some referenced suggestions for building the binocular stereovision ranging platforms are put forward with the method of combining theoretical derivation with the experimental data analysis.

**Keywords:** stereo vision, camera calibration, local matching, seeds propagation, planar constraint

## 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 研究工作的背景与意义 .....	1
1.2 时域积分方程方法的国内外研究历史与现状 .....	1
1.3 本文的主要贡献与创新 .....	1
1.4 本论文的结构安排 .....	2
第2章 时域积分方程基础 .....	3
2.1 时域积分方程的类型 .....	3
2.2 空间基函数与时间基函数 .....	3
2.2.1 空间基函数 .....	3
2.2.2 时间基函数 .....	3
2.2.2.1 时域方法特有的展开函数 .....	4
2.2.2.2 频域方法特有的展开函数 .....	4
2.3 入射波 .....	4
2.4 本章小结 .....	4
第3章 时域积分方程数值方法研究 .....	6
3.1 时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算 .....	6
3.2 时域积分方程时间步进算法阻抗矩阵的存储 .....	6
3.2.1 时域积分方程时间步进算法产生的阻抗矩阵的特征 .....	6
3.2.2 数值算例与分析 .....	6
3.3 时域积分方程时间步进算法矩阵方程的求解 .....	7
3.4 本章小结 .....	8
第4章 全文总结与展望 .....	9
4.1 全文总结 .....	9
4.2 后续工作展望 .....	9
参考文献 .....	10
致 谢 .....	11
外文资料原文 .....	12
外文资料译文 .....	14



## 缩略词表

---









## 第1章 绪论

### 1.1 研究工作的背景与意义

.....

计算电磁学方法<sup>[1-6]</sup>从时、频域角度划分可以分为频域方法与时域方法两大类。频域方法的研究开展较早，目前应用广泛的包括：矩量法（MOM）<sup>[7, 8]</sup>及其快速算法多层快速多极子（MLFMA）<sup>[9]</sup>方法、有限元（FEM）<sup>[1, 3]</sup>方法、自适应积分（AIM）<sup>[5]</sup>方法等，这些方法是目前计算电磁学商用软件<sup>①</sup>（例如：FEKO、Ansys等）的核心算法。由文献[6, 7, 9]可知.....

.....

### 1.2 时域积分方程方法的国内外研究历史与现状

时域积分方程方法的研究始于上世纪60年代，C.L.Bennet等学者针对导体目标的瞬态电磁散射问题提出了求解时域积分方程的时间步进（marching-on in-time, MOT）算法<sup>[8]</sup>。.....

.....

### 1.3 本文的主要贡献与创新

本论文以时域积分方程时间步进算法的数值实现技术、后时稳定性问题以及两层平面波加速算法为重点研究内容，主要创新点与贡献如下：

.....

---

① 脚注序号“①,....., ⑩”的字体是“正文”，不是“上标”，序号与脚注内容文字之间空1个半角字符，脚注的段落格式为：单倍行距，段前空0磅，段后空0磅，悬挂缩进1.5字符；中文用宋体，字号为小五号，英文和数字用Times New Roman字体，字号为9磅；中英文混排时，所有标点符号（例如逗号“,”、括号“()”等）一律使用中文输入状态下的标点符号，但小数点采用英文状态下的样式“.”。

## 1.4 本论文的结构安排

本文的章节结构安排如下：

.....

## 第2章 时域积分方程基础

时域积分方程（TDIE）方法作为分析瞬态电磁波动现象最主要的数值算法之一，常用于求解均匀散射体和表面散射体的瞬态电磁散射问题。

### 2.1 时域积分方程的类型

### 2.2 空间基函数与时间基函数

利用数值算法求解时域积分方程，首先需要选取适当的空间基函数与时间基函数对待求感应电流进行离散<sup>①</sup>。

#### 2.2.1 空间基函数

.....

RWG 基函数是定义在三角形单元上的最具代表性的基函数。它的具体定义如下：

$$f_n(r) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^+} \rho_n^+ = \frac{l_n}{2A_n^+} (r - r_+) & r \in T_n^+ \\ \frac{l_n}{2A_n^-} \rho_n^- = \frac{l_n}{2A_n^-} (r_- - r) & r \in T_n^- \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2-1)$$

其中， $l_n$ 为三角形单元 $T_n^+$ 和 $T_n^-$ 公共边的长度， $A_n^+$ 和 $A_n^-$ 分别为三角形单元 $T_n^+$ 和 $T_n^-$ 的面积（如图2-1所示）。

.....

#### 2.2.2 时间基函数

.....

① 脚注序号“①,……,⑩”的字体是“正文”，不是“上标”，序号与脚注内容文字之间空1个半角字符，脚注的段落格式为：单倍行距，段前空0磅，段后空0磅，悬挂缩进1.5字符；中文用宋体，字号为小五号，英文和数字用Times New Roman字体，字号为9磅；中英文混排时，所有标点符号（例如逗号“,”、括号“()”等）一律使用中文输入状态下的标点符号，但小数点采用英文状态下的样式“.”。

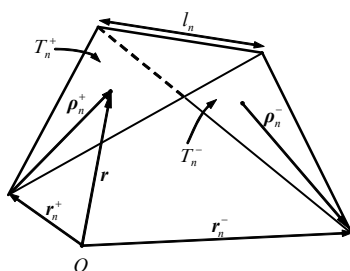


图 2-1 RWG 基函数几何参数示意图

### 2.2.2.1 时域方法特有的展开函数

.....

### 2.2.2.2 频域方法特有的展开函数

.....

## 2.3 入射波

.....

如图2-2(a)和图2-2(b)所示分别给出了参数 $E_0 = \hat{x}$ ,  $a_n = -\hat{z}$ ,  $f_0 = 250MHz$ ,  $f_w = 50MHz$ ,  $t_w = 4.2\sigma$ 时, 调制高斯脉冲的时域与频域归一化波形图。

## 2.4 本章小结

本章首先从时域麦克斯韦方程组出发推导得到了时域电场、磁场以及混合场积分方程。.....

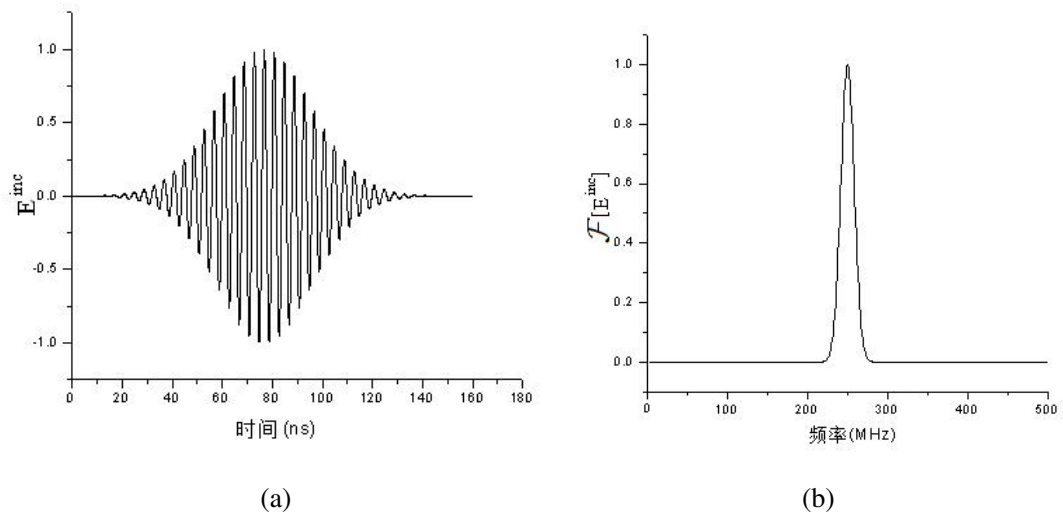


图 2-2 调制高斯脉冲时域与频率波形(a)调制高斯脉冲时域波形;(b)调制高斯脉冲频域波形

## 第3章 时域积分方程数值方法研究

### 3.1 时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算

时域积分方程时间步进算法的阻抗元素直接影响算法的后时稳定性，因此阻抗元素的计算是算法的关键之一，采用精度高效的方法计算时域阻抗元素是时域积分方程时间步进算法研究的重点之一。

.....

### 3.2 时域积分方程时间步进算法阻抗矩阵的存储

时域阻抗元素的存储技术也是时间步进算法并行化的关键技术之一<sup>[7]</sup>，采用合适的阻抗元素存储方式可以很大的提高并行时间步进算法的计算效率。

#### 3.2.1 时域积分方程时间步进算法产生的阻抗矩阵的特征

.....

由于时域混合场积分方程是时域电场积分方程与时域磁场积分方程的线性组合，因此时域混合场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征与时域电场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

#### 3.2.2 数值算例与分析

.....。如表3-1所示给出了时间步长分别取0.4ns、0.5ns、0.6ns 时的三种存储方式的存储量大小。.....。

如图3-1(a)所示给出了时间步长选取为0.5ns 时采用三种不同存储方式计算的平板中心处 $x$ 方向的感应电流值与IDFT 方法计算结果的比较，.....。如图3-1(b) 所示给出了存储方式为基权函数压缩存储方式，时间步长分别取0.4ns、0.5ns、0.6ns 时平板中心处 $x$ 方向的感应电流计算结果，从图中可以看出不同时间步长的计算结果基本相同。

由于时域混合场积分方程是时域电场积分方程与时域磁场积分方程的线性组合，因此时域混合场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征与时域电场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。



表 3-1 计算 $2m \times 2m$ 理想导体平板时域感应电流采用的三种存储方式的存储量比较

存储方式 时间步长	非压缩存储方式	完全 压缩存储方式	基元函数 压缩存储方式
0.4ns	11.96 MB	5.59 MB	6.78 MB
0.5ns	10.17 MB	5.06 MB	5.58 MB
0.6ns	8.38 MB	4.65 MB	4.98 MB

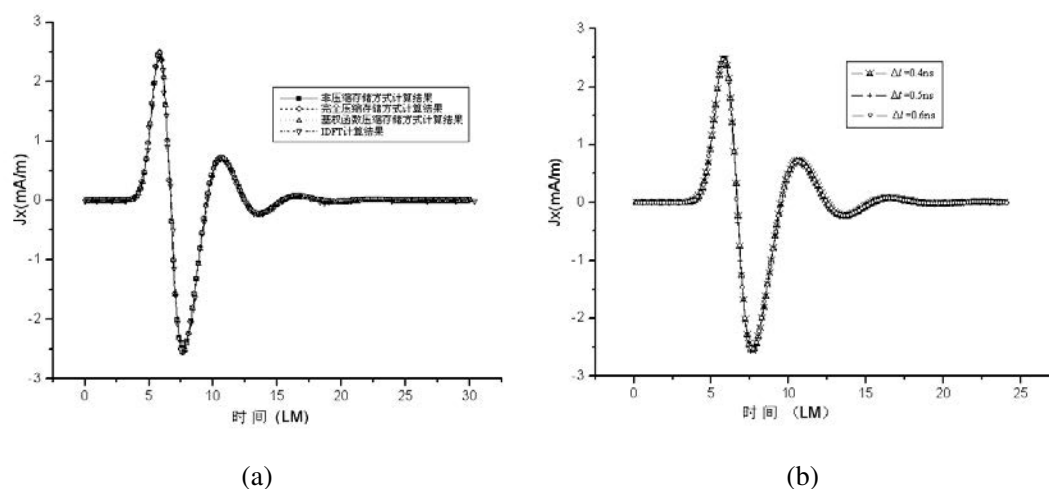


图 3-1  $2m \times 2m$ 的理想导体平板中心处感应电流 $x$ 分量随时间的变化关系(a)不同存储方式的计算结果与IDFT方法的结果比较;(b)不同时间步长的计算结果比较

### 3.3 时域积分方程时间步进算法矩阵方程的求解

.....

**定理 3.3.1** 如果时域混合场积分方程是时域电场积分方程与时域磁场积分方程的线性组合.....

**证明** 首先, 由于.....

.....

根据....., 结论得证。

### 3.4 本章小结

本章首先研究了时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算技术，分别采用DUFFY 变换法与卷积积分精度计算法计算时域阻抗元素，通过算例验证了计算方法的高精度。……

## 第4章 全文总结与展望

### 4.1 全文总结

本文以时域积分方程方法为研究背景，主要对求解时域积分方程的时间步进算法以及两层平面波快速算法进行了研究。

.....

### 4.2 后续工作展望

时域积分方程方法的研究近几年发展迅速，在本文研究工作的基础上，仍有以下方向值得进一步研究：

.....

## 参考文献

- [1] 王浩刚, 聂在平. 三维矢量散射积分方程中奇异性分析[J]. 电子学报, 1999, 27(12):68–71
- [2] X. F. Liu, B. Z. Wang, W. Shao. A marching-on-in-order scheme for exact attenuation constant extraction of lossy transmission lines[C]. China-Japan Joint Microwave Conference Proceedings, Chengdu, 2006, 527–529
- [3] 竺可桢. 物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1973, 56–60
- [4] 陈念永. 毫米波细胞生物效应及抗肿瘤研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2001, 50–60
- [5] 顾春. 牢牢把握稳中求进的总基调[N]. 人民日报, 2012年3月31日
- [6] 冯西桥. 核反应堆压力容器的LBB分析[R]. 北京: 清华大学核能技术设计研究院, 1997年6月25日
- [7] 肖珍新. 一种新型排渣阀调节降温装置[P]. 中国, 实用新型专利, ZL201120085830.0, 2012年4月25日
- [8] 中华人民共和国国家技术监督局. GB3100-3102. 中华人民共和国国家标准—量与单位[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994年11月1日
- [9] M. Clerc. Discrete particle swarm optimization: a fuzzy combinatorial box[EB/OL]. [http://clere.maurice.free.fr/ps0/Fuzzy\\_Discrere\\_PS0/Fuzzy\\_DPS0.htm](http://clere.maurice.free.fr/ps0/Fuzzy_Discrere_PS0/Fuzzy_DPS0.htm), July 16, 2010

## 致 谢

在攻读博士学位期间，首先衷心感谢我的导师 XXX 教授，……  
……

## The Name of the Game

### 1.1 xxx

#### 1.1.1 xxx

##### 1.1.1.1 xxxx

### 1.2 xxx

#### 1.2.1 xxx

##### 1.2.1.1 xxxx

English words like ‘technology’ stem from a Greek root beginning with the letters  $\tau\epsilon\chi\ldots$ ; and this same Greek word means *art* as well as technology. Hence the name  $\text{\TeX}$ , which is an uppercase form of  $\tau\epsilon\chi$ . $\text{\TeX}$  (actually  $\text{\TeX}$ ), meaning of  $\tau\epsilon\chi$

Insiders pronounce the  $\chi$  of  $\text{\TeX}$  as a Greek chi, not as an ‘x’, so that  $\text{\TeX}$  rhymes with the word blecchhh. It’s the ‘ch’ sound in Scottish words like *loch* or German words like *ach*; it’s a Spanish ‘j’ and a Russian ‘kh’. When you say it correctly to your computer, the terminal may become slightly moist.

The purpose of this pronunciation exercise is to remind you that  $\text{\TeX}$  is primarily concerned with high-quality technical manuscripts: Its emphasis is on art and technology, as in the underlying Greek word. If you merely want to produce a passably good document—something acceptable and basically readable but not really beautiful—a simpler system will usually suffice. With  $\text{\TeX}$  the goal is to produce the *finest* quality; this requires more attention to detail, but you will not find it much harder to go the extra distance, and you’ll be able to take special pride in the finished product.

On the other hand, it’s important to notice another thing about  $\text{\TeX}$ ’s name: The ‘E’ is out of kilter. This logo displaced ‘E’ is a reminder that  $\text{\TeX}$  is about typesetting, and it distinguishes  $\text{\TeX}$  from other system names. In fact,  $\text{\TeX}$  (pronounced *tecks*) is the admirable *Text EXecutive* processor developed by Honeywell Information Systems.

Since these two system names are Bemer, Robert, see TEX, ASCII pronounced quite differently, they should also be spelled differently. The correct way to refer to T<sub>E</sub>X in a computer file, or when using some other medium that doesn't allow lowering of the 'E', is to type '—TeX—'. Then there will be no confusion with similar names, and people will be primed to pronounce everything properly.

## 此名有诗意

### 1.1 xxx

#### 1.1.1 xxx

##### 1.1.1.1 xxxx

### 1.2 xxx

#### 1.2.1 xxx

##### 1.2.1.1 xxxx

英语单词“technology”来源于以字母 $\tau\epsilon\chi$ ...开头的希腊词根；并且这个希腊单词除了 technology 的意思外也有 art 的意思。因此，名称 TEX 是  $\tau\epsilon\chi$  的大写格式。

在发音时， $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  的  $\chi$  的发音与希腊的 chi 一样，而不是“x”，所以  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  与 blecchhh 押韵。“ch”听起来象苏格兰单词中的 loch 或者德语单词中的 ach；它在西班牙语中是“j”，在俄语中是“kh”。当你对着计算机正确读出时，终端屏幕上可能有点雾。

这个发音练习是提醒你， $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  主要处理的是高质量的专业书稿：它的重点在艺术和专业方面，就象希腊单词的含义一样。如果你仅仅想得到一个过得去——可读下去但不那么漂亮——的文书，那么简单的系统一般就够用了。使用  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  的目的是得到最好的质量；这就要在细节上花功夫，但是你不会认为它难到哪里去，并且你会为所完成的作品感到特别骄傲。

另一方面重要的是要注意到与  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  名称有关的另一件事：“E”是错位的。这个偏移“E”的标识提醒人们， $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  与排版有关，并且把  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  从其它系统的名称区别开来。实际上，TEX(读音为 tecks)是 Honeywell Information Systems 的极好的 Text EXecutive 处理器。因为这两个系统的名称读音差别很大，所以它们的拼写也不同。在计算机中表明  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  文件的正确方法，或者当所用的方式无法降低“E”时，就要写作“TeX”。这样，就与类似的名称不会产生混淆，并且为人们可以正确发音提供了条件。