

# 计算机视觉测量技术 及在运动控制系统中的应用研究

作者：葛芦生

专业：控制理论与控制工程

导师：龚幼民



上海大学出版社

N533  
Y302  
2002

论文

# 计算机视觉测量技术 及在运动控制系统中的应用研究

作者：葛芦生

专业：控制理论与控制工程

导师：龚幼民

上海大学出版社

· 上海 ·

N533  
2077  
Y302  
2002

Shanghai University Doctoral Dissertation (2002)

# **Computer Vision Measurement Technique and Study of Application in Motion Control System**

**Candidate:** Ge Luseng

**Major:** Control Theory and  
Control Engineering

**Supervisor:** Prof. Gong Youming

**Shanghai University Press**

• Shanghai •

# 上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

## 答辩委员会名单：

**主任：黄 道** 教授，华东理工大学 200030

**委员：汤天浩** 教授，上海海运学院 200135

**李 斌** 教授，上海大学自动化系 200072

**费敏锐** 教授，上海大学机自学院 200072

**余鹿延** 教授级高工，上海电气自动化研究所  
200031

**导师：龚幼民** 教授，上海大学 200072

### 评阅人名单:

|            |                |        |
|------------|----------------|--------|
| <b>黄 道</b> | 教授, 华东理工大学信息学院 | 200030 |
| <b>陈伯时</b> | 教授, 上海大学自动化系   | 200072 |
| <b>姜建国</b> | 教授, 中国矿业大学自动化系 | 221008 |

### 评议人名单:

|            |                  |        |
|------------|------------------|--------|
| <b>曹家麟</b> | 教授, 上海大学         | 200072 |
| <b>汤天浩</b> | 教授, 上海海运学院       | 200135 |
| <b>费敏锐</b> | 教授, 上海大学         | 200072 |
| <b>王清灵</b> | 教授, 安徽理工大学电气工程系  | 232001 |
| <b>岑豫皖</b> | 教授, 安徽工业大学       | 243002 |
| <b>杨维翰</b> | 教授, 安徽工业大学电气信息学院 | 243002 |

## 答辩委员会对论文的评语

葛芦生的博士论文在阅读大量有关文献的基础上,以宝钢集团公司科研项目为实际背景,开展了具有前沿性和开创性的研究工作。论文不仅有较系统的理论分析,而且面向具体的工程实际,有着重要的学术研究价值和实用推广价值。论文有着以下方面的贡献和创新。

(1) 论文对计算机视觉测量技术的主要研究方向和内容进行了综述和研究。将该技术应用于运动控制系统,并归纳出了两类典型的运动物体位置实时测量问题。

(2) 论文利用被测运动物体运动轨迹约束和摄像机成像径向约束间的关系,推导出了一类能消除摄像机径向几何畸变的视觉测量模型。

(3) 论文在分析直线边缘特征匹配相似性的基础上建立了直线相似性测度函数,并扩展到一般的曲线边缘特征匹配。具有创新的意义。

(4) 论文应用推导出的视觉测量模型,提出了一种能减小误差传递和放大作用的全局模型参数标定方法。

(5) 针对运动物体视觉测量实时动态跟踪问题,提出了当运动图像特征失配时将系统状态的 Kalman 滤波预测值作为测量系统输出值的策略。

(6) 论文在所作的理论研究工作的基础上,成功地完成了宝钢连铸板坯长度无接触视觉测量系统的研制工作。

葛芦生同学的博士学位论文内容充实，条理清晰，结构合理，推导严谨，图表规范，仿真和实验工作正确、可信。论文工作表明作者具有坚实的理论基础和很强的独立科研工作能力。在论文答辩过程中，能够清楚地介绍自己的研究工作，能够准确地回答答辩委员所提出的各种问题，具有很强的表达能力。经过答辩委员会投票表决，一致同意通过葛芦生同学的博士学位论文答辩，并建议授予工学博士学位。

## 答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决，全票同意通过葛芦生同学的博士学位论文答辩，建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席：**黄 道**

2001年12月16日

## 摘 要

计算机视觉技术经过 50 年的发展, 已形成基本的理论框架, 随着计算机技术的发展, 作为计算机视觉重要应用方向——计算机视觉测量技术在工业生产过程中应用越来越广泛. 由于视觉测量方法的非接触、大量程和高精度的特点, 对一些特殊测量对象和某些生产现场是其他接触式测量方法无法替代的. 在运动物体位置控制系统中, 反馈测量环节必须满足控制系统的实时性、鲁棒性要求, 本文以宝钢科研项目“基于计算机视觉连铸板坯长度在线跟踪测量系统”为背景, 首次系统研究基于计算机视觉运动物体实时测量系统的技术特点和难点.

首先, 本文对计算机视觉的发展过程和基本理论框架进行了综述, 重点对计算机视觉测量技术的基本模型、测量原理和特点以及计算机视觉测量技术和相关学科的关系进行详细讨论和分析, 指出了目前计算机视觉测量技术主要研究方向和内容; 归纳出应用于运动控制系统中两类典型问题: 带平面轨迹约束的两维运动物体位置测量和空间轨迹约束的三维运动物体位置测量问题.

对于带平面轨迹约束的两维运动物体, 本文根据摄像机透视投影理论, 创造性地运用摄像机成像径向约束关系导出一种完全消除径向畸变的位置测量模型; 对于有空间轨迹约束的三维运动物体, 在分析理想双目摄像机空间坐标测量模型的基础上, 以大型吊车空间运动物体为例, 提出运动轨迹空间约束平面的概念, 导出带空间轨迹约束三维坐标视觉测量模型, 这一

模型消除了摄像机成像径向畸变的影响;在此基础上得到了两个富有创见性的推论,这一研究成果对一类带空间轨迹约束运动物体视觉测量问题有普遍的指导意义。

图像特征运动匹配和立体匹配在实时运动物体跟踪测量和三维空间坐标测量中是一经典又没有完全解决的关键问题;基于空间结构约束运动物体图像边缘的最显著特征是其边缘为直线,本文在系统分析直线边缘特征匹配相似性的基础上建立了完整的直线相似性测度函数,并将这一思想扩展到曲线边缘特征匹配。

建立了正确测量模型后,测量系统的精度取决于模型参数精确标定。本文针对系统测量模型的特点,提出一种全局参数标定方法,并对系统测量误差作了详细的理论分析,在此基础上提出减小测量误差的相关措施。

完成了实际连铸板坯长度视觉测量系统的研制工作,并成功地投入生产运行,本文对该系统硬件设计和软件功能作了详尽分析,重点讨论了测量算法和动态跟踪问题,给出了实际测量系统的技术指标。

研究了基于扩展 Kalman 滤波空间运动物体状态参数预测估计模型和实时跟踪算法,并以大型吊车吊运物体空间轨迹视觉测量模型为例进行了计算机仿真,结果表明该方法可有效解决运动物体视觉测量实时动态跟踪问题;首次提出当运动图像特征匹配失配时用上一时刻预测值作为本时刻实际测量值,满足作为控制系统中反馈测量系统的要求。

最后,本文以连铸板坯长度视觉测量系统为例,对运动物体视觉测量若干关键问题进行了详细讨论和定量分析,重点研究边缘检测算法、动态检测窗口大小和系统扫描速度及特征匹

配失配率之间的关系, 给出的相关结论对一类视觉测量系统设计分析有普遍的指导意义.

**关键词** 视觉测量, 运动物体, 特征匹配, 实时测量, 动态跟踪, 参数标定, 误差分析, 状态预测估计, 径向约束, 直线相似性函数

## Abstract

The fundamental theoretic frame of Computer Vision technology has been formed with the development of 50 years, With the development of computer, computer vision measurement technology has been used more and more widely as its important applied field. With its characteristic of non-contact、large scale and high precision, it can not be substituted by other contact methods for some special objects and applied fields. In the location control system of motion object, its feedback measurement part must meet the need of realtime and robustness of control system, the paper studied systematically the technique feature and key points of realtime measurement system of motion objects based on computer vision.

At first, the paper makes a whole summary of computer vision and its basic theoretic frame, discuss and analyses mainly the fundamental model、measurement principle and characteristics of computer vision measurement technology and the relationships with other related subjects, points out its current study direction and hot questions and the two classic problems applied in motion control system are concluded :2D moving subject location gauge and 3D coordinate measurement with moving locus constraint.

According to camera perspective projection theory, the measurement model for 2D moving subject location is deduced from creative application of camera radial alignment constraint which

eliminates fully radial distortion. Presents a new concept of space constraint plane and gets computer vision measurement model for 3D location with space locus constraint based on the analysis of ideal bi-camera measurement model, which eliminates fully camera radial distortion. On the basis, the two creative deductions are gained. The study results are of prevent guidance to moving subject vision measurement with space locus constraint.

The moving and bi-stereo matching of image feature is a classic and not fully solved question to realtime moving subject and space 3D coordinate measurement. Since line edge is the most prominent feature of casting slab image, the paper establishes line likelihood estimation function based on the analysis of line edge likelihood and extend to curve edge feature match.

After establishment of correct measurement model, the measurement accuracy depends on the precise calibration of model parameters. The paper puts forward a global parameter calibration method according to the measurement model feature of moving locus constraint and makes a detail error analysis; on the basis, brings forward some related measures to decrease the gauge error.

Fulfilled the development of computer vision measurement system for casting slab and put into production successfully; the paper gives a detail analysis of system hardware and software function; emphasizes on the discussion of measurement algorithm and dynamic tracing and gives the technique figure of the real gauge system.

The moving subject state predictive estimation model and realtime tracing algorithm are studied expanded with application of

Kalman filter and computer simulation is made based on the vision gauge model of space locus for large cranes, the results show that the method is a valid solution to the realtime dynamic tracing of moving subjects. It is proposed for the first time that the last predictive value is used as the current one when moving image feature mismatches to meet the need of feedback unit for control system.

At last, the paper presents a detail discussion and quantitative analysis on the key problems for computer vision measurement of moving subject, study mainly on the relations among image edge detect algorithm, detect windows and measurement velocity, feature matching rate ; the given conclusions have prevalent guidance to the design and analysis of a kind of computer vision measurement system.

**Keywords** vision measurement, moving subject, feature match, realtime measurement, dynamic tracing, parameter calibration, error analysis, state prediction estimation, radial constraint, line similarity function

## 目 录

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第一章 绪 论 .....                        | 1  |
| 1.1 计算机视觉技术发展 .....                  | 1  |
| 1.2 计算机视觉的基本理论框架 .....               | 3  |
| 1.3 计算机视觉测量技术 .....                  | 5  |
| 1.4 摄像机成像模型及参数 .....                 | 13 |
| 1.5 运动控制系统中物体视觉测量 .....              | 18 |
| 1.6 计算机视觉测量技术和相关学科的关系 .....          | 25 |
| 1.7 本文的研究背景及主要研究内容 .....             | 26 |
| 第二章 基于径向约束关系视觉测量模型研究 .....           | 28 |
| 2.1 引 言 .....                        | 28 |
| 2.2 摄像机镜头畸变类型 .....                  | 28 |
| 2.3 摄像机成像模型 .....                    | 31 |
| 2.4 连铸板坯长度测量模型 .....                 | 34 |
| 2.5 基于空间平面约束大型吊车运行轨迹视觉<br>测量模型 ..... | 39 |
| 2.6 小 结 .....                        | 49 |
| 第三章 基于空间结构约束运动图像特征匹配 .....           | 50 |
| 3.1 引 言 .....                        | 50 |
| 3.2 空间直线投影变换 .....                   | 50 |
| 3.3 空间直线夹角检测 .....                   | 54 |
| 3.4 基于直线特征的动态边缘匹配 .....              | 54 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 3.5 边缘直线拟合算法 .....               | 58  |
| 3.6 曲线边缘特征匹配算法 .....             | 62  |
| 3.7 小 结 .....                    | 64  |
| 第四章 计算机视觉测量模型参数标定及测量误差分析 .....   | 65  |
| 4.1 引 言 .....                    | 65  |
| 4.2 连铸板坯长度测量模型参数标定 .....         | 66  |
| 4.3 大型吊车空间位置测量模型参数标定 .....       | 72  |
| 4.4 系统测量误差分析 .....               | 74  |
| 4.5 小 结 .....                    | 89  |
| 第五章 基于计算机视觉连铸板坯长度在线跟踪            |     |
| 测量系统 .....                       | 90  |
| 5.1 引 言 .....                    | 90  |
| 5.2 系统硬件结构 .....                 | 92  |
| 5.3 运动板坯边缘检测动态跟踪测量 .....         | 93  |
| 5.4 边缘检测算法 .....                 | 96  |
| 5.5 系统应用软件 .....                 | 101 |
| 5.6 测量系统性能指标 .....               | 114 |
| 5.7 小 结 .....                    | 115 |
| 第六章 基于 Kalman 滤波空间物体运动状态参数预测     |     |
| 估计及动态跟踪测量 .....                  | 117 |
| 6.1 引 言 .....                    | 117 |
| 6.2 大型吊车空间轨迹运动状态方程 .....         | 118 |
| 6.3 基于 Kalman 滤波运动物体状态估计算法 ..... | 120 |
| 6.4 非线性系统状态预测估计 .....            | 128 |
| 6.5 大型吊车空间运行轨迹预测估计计算机仿真 .....    | 133 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 6.6 小 结 .....                          | 137 |
| 第七章 运动物体视觉测量系统关键问题讨论分析 .....           | 138 |
| 7.1 引 言 .....                          | 138 |
| 7.2 边缘检测算法与扫描速度的关系 .....               | 138 |
| 7.3 相似性评价函数项权系数分析和特征匹配<br>失配率的关系 ..... | 144 |
| 7.4 实时测量系统中运动图像特征失配处理 .....            | 146 |
| 7.5 外极约束法立体匹配 .....                    | 148 |
| 7.6 测量视场大小和测量环境的影响 .....               | 151 |
| 7.7 小 结 .....                          | 154 |
| 第八章 总结与展望 .....                        | 155 |
| 参考文献 .....                             | 158 |
| 致 谢 .....                              | 164 |

# 第一章 绪 论

## 1.1 计算机视觉技术的发展<sup>[25,26,28]</sup>

计算机视觉 (CV) 或称图像理解研究的主要内容是通过计算机分析景物的二维图像, 从中获取三维世界的结构和信息, 进而完成在复杂环境中识别、定位、导航和空间轨迹运动控制等任务。

计算机视觉的研究起始于 20 世纪 50 年代, 至今已有 50 年的发展历程, 早期的研究主要是二维灰度图像的分析, 重点在静态景物单幅二维图像, 如: 显微照片、航空地貌、遥感图象等。由于表面几何关系和物体取向已知, 恢复和识别都比较容易实现, 对这类图像的处理和解释称为图像处理 (IP) 和模式识别 (PR), 尽管 IP、PR 和 CV 的研究有许多共同之处, 其研究内容还是有明显的区别, 图像处理的主要目的是通过处理原始图像得到某一方面更有利的新图像, 主要包括图像增强、图像恢复、图像压缩等; 模式识别关心的则是将一些模式归入预先定义的有限类别中, 主要研究的是二维模式; 而计算机视觉主要考虑的是对三维世界的描述和理解。

20 世纪 60 年代末 70 年代初, 计算机视觉研究的很多工作是关于低层视觉处理, 从图像中提取重要的强度变化信息——边缘检测, 作为边缘检测的补充, 图像分割——寻找图像中同