

学位被授与者氏名	邨 大勇 (Tai Dayong)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第70号
学位授与年月日	2023年3月20日
論文題目	Integration of Laser line scanning system on portable coordinate measuring machine
論文題目 (英訳または和訳)	携帯型座標測定機にレーザーラインスキャンシステムの統合
論文審査委員	論文審査委員会 委員主査 : 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 盧 存偉 同審査委員: 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 宋 宇 同審査委員: 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 近木祐一郎 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 江口 啓
論文審査機関	福岡工業大学大学院工学研究科
論文内容の要旨 (和文)	<p>自動化技術の急速な発展にともない、複雑な部品の機械的精度に対する要求がますます高くなり、現代の測定技術には、必要な生産部品や装置の開発が迫られている。スキャンング構造光計測技術は、高速性、高柔軟性、高精度という利点を持ち、被測定物の表面材質にほとんど依存しないのが特徴である。表面輪郭抽出、リバーエンジニアリング、製品表面の不具合検出などの分野で広く利用されている。構造光やカメラは単体ですべての対象物をスキャンできないため、座標測定機やマニピュレーター、回転テーブルなどと組み合わせて、対象物の3D情報を取得できる。測定アームは、その柔軟性、軽量性、広い測定範囲から、ワークの寸法測定に広く使用されている。測定アームと構造光測定の長所を生かし、構造光を測定アームの上端に固定されたカメラと組み合わせて、測定アーム構造光スキャンシステムを構成する。</p> <p>スキャン構造光システムは、光の種類によってシングルライン構造光システムとクロスライン構造光システムに分けられる。シングルライン構造光システムは、レーザーを1本だけ発光させ、カメラに1本の線を結像させる。ライトバーの抽出はポリラインでなく実装が容易なため、構造光の直交方向に広く用いられているが、複雑な曲面のデジタルモデルは精度が低いため、異なる方向に沿って複数回の計測が必要である。クロスライン構造光は、その2つの光平面が互いに垂直であるため、測定物の端がライトバーと平行になる問題を解決できる。しかし、ライトバーをカメラが抽出する面が不明瞭なため、3D再構成が非常に困難となる。多くの学者が、一言で多義的な意味という課題を解決する方法を研究してきた。本論文では、ライトバー抽出不明瞭を解決するために、周期的に2つのレーザー発光器を制御することである。具体的には、1つのレーザーのスイッチを入れ、スイッチを切り、もう1つのレーザーのスイッチを入れ、最後に2つのレーザーのスイッチを同時に入れ、2つのレーザーを周期的に動作させる。この方法の優位性は、1)複雑な曲面のスキャンが可能、2)低コスト、3)スキャン効率を向上させる。最後に、複数ライン構造光カメラは、工業計測において幅広く利用される。フレキシブル測定アームが提供する空間姿勢と、複数ライン構造光カメラのスキャン効率を融合で、両方の優位性を組み合わせてスキャン測定システムを形成する。ドットマトリクス校正板を用いて、双眼カメラと構造光の光学面パラメータを調整し、双眼カメラの極性制約とレーザー一面を利用して3D再構成を行うことで、スキャン効率を大幅に向上させることが期待できる。</p> <p>本論文は以下の6章から構成されている。</p> <p>第1章はレーザー構造ライン計測の背景と多関節アーム座標測定機の開発、本論文の研究目的について述べる。</p> <p>第2章は単線構造の三次元再構成技術とキャリブレーションモデルを検討する。</p> <p>第3章は二重レーザーを用いた交差線構造ラインの三次元再構成技術を解明する。</p> <p>第4章はマルチライン三次元再構成技術とマーキング機能の代替方法について説明する。</p> <p>第5章は実験結果を示し、有効性を検証する。</p>

	第6章は本稿の内容をまとめ、今後の課題について論じる。
論文内容の要旨 (英文)	<p>With the rapid development of automation technology, greater and greater machine accuracy of complex parts is required, which has put pressure on modern measurement technology to develop the necessary production components and equipment. Scanning structured light measurement technology is high speed, highly flexible, highly accurate, and barely influenced by the surface material of the measured object. It is widely used in surface contour extraction, reverse engineering, product surface defect detection, and other fields. Because the structured light and camera cannot scan all the objects by itself, it must be used with a coordinate measuring instrument, manipulator and turntable to obtain the objects' three-dimensional information. The measuring arm is widely used in the measurement of workpiece size due to its flexibility, light weight and wide measuring range. Combining the advantages of a measuring arm and structured light measurement, a measuring arm structured light scanning system is constructed by combining structured light and a camera fixed at the upper end of the measuring arm.</p> <p>The scanning structured light system can be divided into single-line structured light systems and crosshair structured light systems according to the type of light. The single-line structured light emitter only shoots out a laser line, and images a line in the camera. The extraction of light strips not being polysemous, it is easy to achieve, and so is widely used along the orthogonal direction of the structured light, and the digital modulus accuracy of the complex surface is not high, so it needs to be measured several times along different directions. Crosshair structured light can solve the problem that the measured edge is parallel to the light bar because its two light planes are perpendicular to each other. However, due to the ambiguity of the plane where the light strips extracted from the camera are located, 3D reconstruction is difficult. Many scholars have conducted research into how to solve the problem of polysemy.</p> <p>In this paper, the method to solve the ambiguity of light strip extraction is to periodically control the two-line laser emitters. Specifically, one laser is turned on, turned off, and the other laser is turned on, and the last two lasers are turned on at the same time, and the two lasers work periodically. The advantages of this method are as follows: 1) It can scan complex surfaces, 2) It is low cost, and 3) It can improve scanning efficiency. Finally, the multi-line structured light camera has a wide range of applications in industrial measurement, using the flexible measuring arm to provide the spatial attitude and the characteristics of the multi-line structured light camera scanning efficiency, combine the advantages of both to form a scanning measurement system. The optical plane parameters of the binocular camera and structural light were calibrated with the dot array calibration plate, and the polar constraint and laser plane of the binocular were used for 3D reconstruction, which greatly improved the scanning efficiency.</p> <p>The outline of this thesis is as follows.</p> <p>Chapter 1 introduces the background of the laser structured light measurement and development of the articulated arm CMM, and the purpose of this research.</p> <p>Chapter 2 study single-line structured 3D reconstructed technology and calibration model.</p> <p>Chapter 3 presents cross-line structured light based on two lasers 3D reconstructed technology.</p> <p>Chapter 4 presents multi-lines 3D reconstructed technology and the method of replacing of the function of marker points.</p>

	<p>Chapter 5 shows the experimental results of the proposed method to verify the effectiveness of the method.</p> <p>Chapter 6 summarizes this paper and elaborate the future topic.</p>
論文審査結果	<p>この論文は接触式計測に属するプローブ式計測用ロボットアームと非接触式計測に属する三次元画像計測技術を融合し、計測の高精度化と高速度化を目指してマーカ不要な三次元計測システムの構築について研究を進めている。この研究は理論的な価値だけでなく、実用化の価値も持っていると判断される。</p> <p>三次元計測は接触式と非接触式に大別できる。プローブ式三次元計測機のような接触式計測では、計測精度が高いが、一回の計測では一点の三次元情報しか取得できないので、計測時間が長い。一方、三次元画像計測のような非接触式計測では、一回の計測で複数点の三次元情報を取得することができ、計測の速度が速いが、全周囲計測のための三次元合成精度が比較的低い。</p> <p>この論文では、上記の問題を解決するために、計測ロボットアームに三次元画像計測技術を取り入れることで計測の高速度性を確保し、また、ロボットアームの座標関係を利用し三次元合成の高精度を確保することより、計測精度と計測速度の両立ができる計測手法を提案した。具体的には、まずロボットアーム、カメラ、レーザー投光器を用い計測システムのハードウェアを構築した。また、計測のためのパターン光として、シングルライン、クロスライン、マルチラインの三種類を提案し、それぞれの計測システムを実装した。加えて、ロボットアームシステムとカメラシステムの包括的なキャリブレーション手法も提案した。</p> <p>この論文は6章より構成されている。第1章では、研究の背景と既存の手法について説明し、計測用ロボットアームと三次元画像計測技術を融合する考え方を述べ、研究の目的を説明する。第2章では、シングルライン投影三次元計測について、第3章では、クロスライン投影三次元計測について、第4章では、マルチライン投影三次元計測について説明する。展開方法として、まずハードウェアの構成と数学モデルの構築を説明し、その後、システムのキャリブレーション方法について述べる。第5章では、実験及び結果の考察を説明する。まず実験環境を紹介し、シングルライン、クロスライン、マルチライン投影システムにおける三次元計測の実験結果をそれぞれ説明し、計測精度分析、各手法の特徴と計測結果の比較について述べる。第6章では、この論文をまとめ、今後の課題について述べる。</p> <p>これらのことより、提案手法には有用性があると判断された。</p> <p>本研究の成果として、学術論文が3編（内第一著者3編）、国際会議1編（内第一著者1編）となっている。これらの結果には、本研究の新規性、有用性、ならびに、実用性が認められる。以上の理由により、審査委員会は提出論文が学位論文の内容として適合すると判定した</p> <p>学位論文公聴会においては、論文内容に関連する種々の工学的及び技術的な質問があったが、いずれも適切な回答を行うことができた。また公聴会後の最終試験においては、学位論文に関連する分野の学識を有し、今後研究を進めていくための研究能力を備えていることが判明した。</p> <p>以上の結果から、学位審査委員会はこの論文が博士（工学）の学位に適格であると判定した。</p>
主な研究業績	<p>参考論文 6編1冊</p> <p>学術論文：2編，第一著者2編</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. “Hand-eye calibration method of articulated arm and linear structured light 3D camera based on the plane”, has been accepted for publication in OA Journal of Engineering & Technology, and published it in December 2022. Authors: <u>Dayong Tai</u>, Zhixiong Wu, Ying Yang, Cunwei Lu 2. “Flexible measuring arm scanning system based on multi-line structured light camera”, has been accepted for publication in IET Image Processing 1751-9659 in end of November, and published it in February 2023. Authors: <u>Dayong Tai</u>, Zhixiong Wu, Ying Yang, Cunwei Lu

国際会議論文：1編,第一著者1編

1. “Cross line structured light scanning system based on measuring arm”, 2nd International Conference on Electrical, Computer, Communication and Mechatronics Engineering (ICECCME 2022) November.2022
Authors: Dayong Tai, Zhixiong Wu, Ying Yang, Cunwei Lu

国内会議論文：3編,第一著者1編

1. “The Hand-eye Calibration Method for Measuring Arm with Single Pattern Projection on Single Plane”, IIEEJ 画像電子学会 August.2022
Authors: Zhixiong Wu, Cunwei Lu, Dayong Tai, Ying Yang
2. “Plane-based Hand-eye calibration method between measuring arm and linear structured light 3D camera”, IEICE 電子情報通信学会 March.2022
Authors: Dayong Tai, Zhixiong Wu, Ying Yang, Cunwei Lu
3. “Pseudorandom Coding and Decoding Method for Single Pattern Projection 3D Image Measurement”, IEICE 電子情報通信学会 March.2022
Authors: Zhixiong Wu, Dayong Tai, Ying Yang, Cunwei Lu

(追加論文)

1. “A Cross-Line Structured Light Scanning System Based on a Measuring Arm” has published in 3 January 2023 in Instruments 2023,7(1),5.
Authors: Dayong Tai, Zhixiong Wu, Ying Yang, Cunwei Lu