



粗面物体の非接触三次元計測法に関する研究

松本, 哲也

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1996-03-13

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2018

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002018>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・(本籍)	まつもとてつや 松本哲也	(兵庫県)
博士の専攻分野の名称	博士(工学)	
学位記番号	博ろ第139号	
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当	
学位授与の日付	平成8年3月13日	
学位論文題目	粗面物体の非接触三次元計測法に関する研究	

審査委員	主査	教授	峯本	工		
		教授	高森	年	教授	森脇俊道
		助教授	吉村	武晃		

論文内容の要旨

近年、生産工場内の自動化の進展に伴い、生産性向上の鍵となる、製品の三次元形状や位置等のセンシング技術の開発が強く求められてきている。粗面物体の非接触三次元計測技術は、測定対象に対して無侵襲であるため、柔らかくて傷つきやすい物体の測定など、従来の接触式測定の問題点を解決できる技術として、またセンサを近づける必要がないリモートセンシング技術として適している。しかしながら、従来の三角測量法ならびにモアレ法には、距離測定範囲、測定感度の可変性など、解決すべき問題が多く残されていた。また、これらの基盤技術を実用化するために必要なシステム化技術の開発が遅れていた。

そこで本研究では、三角測量法ならびにモアレ法を用い、工業製品の検査工程や位置決め、識別、設計工程への適用が可能な、粗面物体の非接触三次元計測法についての提案を行った。

本論文は、全体として6章から構成されている、各章の内容を要約すると、以下の通りである。

第1章では、生産工場における自動化の進展に伴う、粗面物体の非接触三次元計測の必要性の増大と、三次元計測技術の現状、ならびにその課題について概括し、本研究の位置付けを行った。

第2章では、光の屈折臨界角特性を利用することにより、三角測量法における距離測定範囲を拡大させる手法を提案し、この手法を用いて粗面物体の高精度な三次元形状計測を行う方法を提示した。

三角測量法では、測定距離の変化に伴って、物体表面からの散乱光のセンサへの入射角が変化する。ここでは、直角プリズム斜面の屈折臨界角付近の特性を利用し、光の入射角すなわち距離を広範囲にわたって測定できる技術を開発した。距離測定実験では、半導体レーザー光を用いる構成で、距離30cmから60cmまでを1.3mm以内の安定した精度で測定できることを示した。また、約30cm先に置かれた白色粗面の円筒物体の断面形状を測定し、本方法の有効性を示した。さらに、測定精度に影響を及ぼす、物体の反射率とレーザー光の表面への入射角について考察した。

またこの方法を発展させ、照射レーザー光に変調光を用い、受光信号をロックインアンプにより同期位相検波することにより、発光体の形状計測、あるいは蛍光灯などの外乱光の環境下においても三次

元物体の形状を安定して測定できる方法を提案した。実験では、光が周期的に点滅する球面発光体表面の三次元形状を測定し、連続発振光照射型では測定不能な場合にも三次元形状測定が可能であることを確認した。

ここで提案した手法は、従来の光プローブ型距離センサに比べ、測定距離が最大で60cmと長く、また距離測定範囲が実験で示した範囲内で最大30cmと広い利点がある。

第3章では、微小変位を非接触で高精度に測定できるレーザ変位計を用い、三角測量法により、靴木型の全方向からの三次元形状を測定できる実用化システムを提案した。

レーザ変位計には距離測定範囲が64mmのものを用い、木型のつま先とかかとを支持して回転させ、レーザ光により表面上を走査することで、木型の輪切り形状と縦断面形状を高精度に測定できる。23.5cmの木型の形状測定実験を行った結果、従来から行われている多関節型三次元測定機による測定と比較して高精度であることがわかった。測定に要した時間は、従来の手動測定の場合の約1/36になり、大幅に短縮された。この2点より、本方法の有効性を確認することができた。また形状測定精度に関係する因子として、装置の配置、木型表面の傾斜角度、および駆動系の分解能による影響を考察した。

結果として、奥行きが100mm程度ある粗面物体の全方向からの三次元形状を、測定精度0.1mm以上で測定できる実用化システムを提示できた。

第4章では、ハンドにTVカメラを搭載した多関節型ロボットを用い、三角測量法により、実装基板上のロータリーDIPスイッチの三次元位置を高精度に測定するシステムを提案した。

このシステムは、スイッチの三次元位置測定の後、ロボットハンドの先端に取り付けられたドライバーをスイッチの幅0.7mmの溝に挿入し、スイッチを自動で切り替えられる機能を有する。まず、120mm×80mmの実装基板全体を観測できるTVカメラでスイッチ溝のおおまかな二次元位置を測定し、次にハンドに取り付けたTVカメラを用い、三角測量法によりスイッチ溝の三次元位置を高精度に測定できる。実験では、スイッチのロータリーシャフト部中心の位置座標を、 x, y 方向に0.1mm以内、 z 方向に0.2mm以内の精度で求めることができた。さらに、ドライバーの中心軸の偏心が三次元位置測定結果に及ぼす影響について考察を加えた。

結果として本システムでは、1台のTVカメラを移動させる三角測量法により、画像中の注目点の三次元位置を高精度に測定できる方法を確立できた。また視覚センサ付ロボットを用い、スイッチの切り換え作業の自動化に有効なシステムを提案することができた。

第5章では、レーザ光の干渉縞を投影格子として用いる方式の、モアレ縞間隔可変型のモアレ縞等高線法（レーザモアレ法）を提案した。この方法は、物体の奥行きにより、モアレ縞の間隔を連続的に変化させ、最適な本数のモアレ縞を物体表面上に出現させることができる利点を有する。

まず従来からのモアレ法の開発の流れと、その技術課題を提示した後、レーザモアレ法を用いてモアレ縞の間隔を変化させる機構を示した。実験では、まず白色平板上にさまざまな間隔のモアレ縞を生成させ、モアレ縞の間隔の変化が理論値とよく合致することを示した。また球面上で、縞間隔を160 μ mから1.6mmまで10倍にわたって変化させたモアレ画像が安定して得られることを示した。

またこのレーザモアレ法を発展させ、モアレ縞の位相をシフトさせ、モアレ縞の1周期以内に奥行きが収まる小物体の三次元形状を、高精度に測定できる方法を提案した。この場合にもモアレ縞間隔が可変であるため、さまざまな物体の奥行きに合わせて縞の間隔、すなわち奥行き測定範囲および感度を設定できる利点がある。従来の位相シフト法では、位相が 2π を越える場合に位相の接続をしなければならなかったが、ここで提案した方法では、この問題を回避できた。実験では、モアレ縞の間

隔を $160\mu\text{m}$ と $300\mu\text{m}$ の間で変化させ、モアレ縞間隔の $1/36$ 以上の測定精度が得られることを示し、本方法の有効性を確認した。

以上の他、本章で提案した方法は、以下の特長を有する。

- (1) 平行光を投影しているために焦点深度が非常に深く、測定物体の精密な位置決めを必要としない。
- (2) 生成されるモアレ縞の間隔が一定である。これにより、位相シフト法でモアレ縞の間隔を求めるための演算が簡単になる。
- (3) 干渉縞を用いているにもかかわらず、振動の影響を受けにくい。
- (4) 奥行き $500\mu\text{m}$ 以内の三次元物体に対しては、その形状を高精度かつ連続的に定量測定できる。それ以上の凹凸を有する物体に対しては、撮像光学系の焦点深度の範囲内で、物体表面上にモアレ縞等高線を観測できる。

第6章では、本研究で得られた成果をまとめて述べるとともに、今後、産業発展に貢献してゆくために克服すべき技術課題について言及した。

結論として本研究では、粗面物体の非接触三次元計測に有用な三角測量法とモアレ法に関して、従来からの技術課題の一部を解決することができた。同時に、実用上有効なシステム化技術を提案することにより、非接触三次元計測技術の生産現場への導入の可能性を広げることができた。

論文審査の結果の要旨

近年、生産技術の自動化が著しく進歩した中で、加工部品および製品の三次元形状検査等の行程は、いまだ自動化が実現できず、人力に依存している。この自動化が実現されていない背景には、製品の置かれている位置や向きを自動測定し決定する技術及び形状を正確に測定する技術で自動化システムに適合可能なものが不足しているという事実がある。したがって、工業製品などの三次元形状を迅速正確に測定する技術の開発が待望されている。このような時代背景の下に、本論文は粗面を持つ工業製品などの物体の三次元形状を非接触に傷つけることなく測定する技術の開発に関する研究成果をまとめたものである。

第1章では、生産行程における自動化の進歩に伴う、粗面物体の非接触三次元計測の必要性の増大と、三次元計測技術の現状ならびに課題について整理し、三角測量法ならびにモアレ法を改良・応用した本研究の位置づけを述べている。

第2章では、光の屈折臨界角特性を利用した新しい三角測量法を提案している。この手法によって、比較的短い距離で有効であると言われていた従来の光プローブ型距離センサに比べ測定最大距離が 60cm と長くでき、測定範囲も最大 30cm に拡張した。そして粗面物体の三次元形状を高精度に測定できるようになったことを示している。

三角測量法では、測定点の位置や距離の変化にともなって物体表面から反射（または散乱）されてくる光の光センサへの入射角が変化する。ここでは、直角プリズム斜面における屈折臨界角付近での反射光と屈折光の強度比が急激に変化する特性を利用し、物体面までの距離を広い範囲にわたって測定できる技術を開発した。半導体レーザを光源に用いた実験で、距離 30cm から 60cm を 1.3mm 以内の精度で測定可能なこと実証した。また、 30cm 前方に置いた白色粗面の円筒物体の断面形状を測定して本方法の有効性を示し、レーザ光の物体表面への入射角と表面の反射率が測定精度に及ぼす影響について考察し、精度良く測定するための条件を整理している。

さらに本方法を発展させ、強度変調したレーザ光で物体を照射し、光センサからの出力信号をロッ

クインアンプで位相同期検波することにより、従来の光を用いた形状測定の手法では不可能であった発光体の形状計測や蛍光灯などの外乱光のもとに置かれた物体の形状計測を安定に行える手法を開発した。

第3章では、微小変位を非接触で高精度に測定できるレーザ変位計をセンサに用いた三角測量システムを構成して、靴木型の立体形状を測定する実用システムを提案し、その有用性を示し、地場産業の技術発展に寄与した。

レーザ変位計には距離測定範囲が64mmのものを採用し、木型のつま先とかかとを支持して回転させ、型を輪切りにした形状と縦断面形状を高精度に測定するシステムを試作し、奥行きが100mm程度ある物体の全方向からの三次元形状を±0.1mmの精度で測定できることを示した。また、23.5cmの木型の形状測定を行い、従来から行われていた多関節型三次元測定機による測定に比較して約1/36の時間で高精度に測定できるようになった。さらに開発したシステムの測定精度に影響する要因についても検討し、考察を加えている。

第4章では、多関節ロボットのハンドに登載したテレビカメラを利用した三角測量法により、生産ライン中の検査台に置かれた実装基盤上のロータリーディップスイッチの三次元位置とスイッチ回転軸の回転角を高精度に測定するシステムを提案した。本システムでは、1台の移動テレビカメラによる三角測量法によって画像中のスイッチシャフトの中心位置を水平面内で0.1mm以内、垂直方向で0.2mm以内の精度で決定でき、ロボットハンド先端に取り付けたドライバーでシャフトを回転させ、スイッチの切り替えを自動的に行えるようにした。視覚センサを検出部として三角測量システムによって、被検査物体である実装基盤の検査台上での設置位置や向きに関して柔軟に対応できる従来にないシステムを構成した。

第5章では、レーザ光の発生させた干渉縞を投影格子に使用する方式のモアレ縞等高線法（レーザモアレ法）を提案し、干渉縞格子間隔を測定物体の奥行きに応じて可変にできるシステムを構成した。ここで提案している方法は、

- (1) 干渉縞の平行光束を物体に投影するため、投影格子像の焦点深度が非常に深くなり、測定物体の正確な位置決めを必要としない、また奥行きが深い測定物体にも適用できる、
- (2) 生成されるモアレ縞が等間隔になるため、位相シフト法を導入した際の信号処理が簡単になる。
- (3) 干渉縞を使用するにもかかわらず、測定結果が振動の影響を受けにくい、
- (4) 奥行き500 μm 以内の三次元物体については、その形状を高精度かつ連続的に定量測定できる、などの特長を有している。

実験では、160 μm から1.6mmの縞間隔を持つ安定したモアレ縞が得られること、位相シフト法によってモアレ縞間隔の1/36の測定精度が得られることを確認した。

第6章は本研究で得た成果と今後解決すべき課題をまとめている。

本研究は、三角測量法及びレーザモアレ法による粗面物体の非接触形状計測技術について研究したものであり、物体の非接触三次元計測に関する重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、本論文は、学位申請者松本哲也は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。