

氏 名 ( 本 籍 )	Inga SKIEDRAITE(リトアニア)
学 位 の 種 類	博 士 (工学)
学 位 記 号 番 号	甲 第 129 号
学 位 授 与 年 月 日	平 成 13 年 3 月 24 日
専 攻	生産開発システム工学専攻
学 位 論 文 題 目	Some Contributions to Opto-mechanical Measurement Assisted by Non-linear Image Transformation (非線形画像変換を用いた光・機械的測定法に対する二、三の提言)
学位論文審査委員	(主査) 教 授 藤 井 洋 (副査) 教 授 丸 井 悦 男 教 授 岡 村 政 明 助教授 加 藤 隆 雄

## 論文内容の要旨

光を用いた寸法や形状の測定法は、近年多くの生産現場で使われている。寸法ばかりでなく形状や色が測れること、非破壊試験が可能であるため固体ばかりでなくゲルや液体も対象とすることができるなど、優れた特徴を有している。しかし、測定の解像度は常に CCD の数によって制限を受けるので、その測定精度は対象物の大きさに反比例して悪化していく。これは通常避けがたいこととして受け容れられている。

本研究は、上記の現状を踏まえ、光・機械的測定法の精度を向上させ、あるいは応用範囲を広げるためにはどのような技術的展開が必要であるかを探ることを目的として始められたものである。本論文ではそのうち二つの提案と実験の結果を、Part I および Part II の二つのパートに分けてまとめている。

Part I では、FMS ラインなどで多用される CCD カメラを使用した寸法および形状の測定システムに対する提案である。このようなシステムでは被測定物のサイズは一定でなく、そのため大きい物体に対する測定精度は非常に悪い。これは、CCD カメラを使う限り、大きな物体はその全てを視野内に収めなければ測定できないからである。しかし、たとえば大きな円柱の直径を測る場合に本当に必要な情報は、その円の両端の位置付近のみの画像情報である。間にある画像の大部分は測定には全く必要がない。もし両端の画像だけを取り出し、それを使って寸法を測定することができれば、大きい被測定物も小さい被測定物も同じ精度で測れることになる。

そこで本研究では、一つの面が傾きの異なる 3 ないし 8 個の面に分割された特殊な三角形プリズムを作ることによって、被測定物の端面情報のみを取り出す方法を提案している。これがはたして可能であるか否かをまず理論的に検証し、分割面の角度と視野の関係および被測定物の大きさと解像度との関係を明らかにした。実験は、この分割面を 7 枚の鏡に置き換えて行い、さらにこれを 4 枚に減らしても行っている。その結果、提案したシステムを使えば、数 mm の被測定物から 180 mm の被測定物に至るまで、レンズ系などは全く動かさずに、全領域にわたってほとんど同じ精度で測

定可能であることを明らかにした。

ついで、このシステムを使えば、レンズをテレセントリックレンズという視野角が0度であるレンズに置き換えることができることを理論と実験の両面から明らかにしている。このレンズは、遠い物体と近い物体が全く同じ大きさに写るという特徴を持つが、レンズの直径より大きい被測定物は全く測ることができない。このため、その優れた特徴にもかかわらず、極めて限定された範囲でしか使われていない。本研究では、ここで提案している方法を使えば、テレセントリックレンズの直径の4.5倍の被測定物まで、しかも良好な解像度を保ったままで測定可能であることを明らかにした。これによってこのレンズの応用範囲が飛躍的に拡大することが期待される。

Part II では、薄い刃物の先端形状や立方体形状の切削工具の角の形状を測定する方法に関する研究をまとめている。ある意味では大変不思議なことであるが、工業界には、現在に至るも固体の鋭い角の形状を表す工業規格がない。たとえば、刃物メーカーが各種の刃物を製作するときも、刃物材料や用途による刃先丸みの規格は全く存在しない。なぜなら、非破壊的に、オンラインで、かつ十分な精度をもつ測定法が存在しないからである。

本研究では、この鋭い角の形状を光・機械的に測定できる測定法を提案している。提案する二つの方法は、いずれも刃先先端の各部での数学的接線をまず鏡を使って機械的に捉え、それを光レバーで拡大し、CCD カメラで記録し、これを基に数学的に元の形状を再現しようとするものである。

第一の方法は、鋭い刃の上にガラス板を置き、刃を回転させたときのガラス板の傾きと上下方向の動きを拡大する方法である。第二の方法は、測定される刃の両側から、固定された中心の周りに回転する2枚のガラス板を接しさせ、測定物を回転させたときに生ずるガラス板の角度変化をレーザ反射光によって読み取る方法である。この測定値を基に、刃の接線を構成する一群の直線を求め、これらの直線群の包絡線から測定物の形状を再構築する方法である。

測定の精度は、二つの方法共に機械部分の製作精度、鏡の敏感性、CCD の解像度によって大きく左右される。実際にシステムを設計し、試作し、測定実験を行った。その結果、第二の方法には数多くの優れた特徴があり、実用化に近い距離にあることが明らかになった。現時点では、必ずしも十分満足できる精度を得ているとは言えないが、非破壊的に、オンラインで、かつ十分な精度で鋭い刃の形状を測定するという当初の目的は達成されたと考えている。なお、製作したシステムの現状での問題点とその解決法も述べている。

## 論文審査結果の要旨

提出された論文は、研究課題の適否、提案の独創性の有無、理論的な吟味と実験的確認の有無、工業界への応用の可能性などの諸観点から審査した。審査した結果は以下のとおりである。

研究課題は適切なものであるか： 物体の寸法や形状を CCD カメラを用いて測定しようとする際の最大の問題は、測定の解像度が常に CCD の数によって制限を受ける事にある。この論文では、CCD カメラを用いた光・機械的測定法の精度を向上させ、その応用範囲を広げるためにはどのような技術的展開が可能かを探索の試みが二つ行われており、それらが Part 1 と Part 2 に分けて纏められている。Part 1 は、CCD カメラを用いたときの測定精度は対象物の大きさに反比例して悪化していくが、画像変換に何らかの非線形性を導入することによってこれを解決しようという試み

である。Part 2 では、薄い刃物の先端形状や切削工具の角の形状を測定する方法を模索している。これは「現在に至るも固体の鋭い角の形状を表す工業規格がなく、刃物メーカーが各種の刃物を製作するときも、刃物材料や用途による刃先丸みの規格は全く存在しない。なぜなら、非破壊的に、オンラインで、かつ十分な精度をもつ測定法が存在しないからである」ことから始められたものである。両課題共に研究課題として時宜を得た適切なものであると判断される。

課題を解決するための提案は独創的であるか： この論文では主に二つの提案が行われている。Part 1 では、「たとえば大きな円柱の直径を測る場合に本当に必要な情報は、その円の両端の位置付近のみの画像情報であって、間にある画像の大部分は測定には全く必要がない。もし両端の画像だけを取り出し、それを使って寸法を測定することができれば、大きい被測定物も小さい被測定物も同じ精度で測れることになる」という発想である。Part 2 では、刃先先端の数学的接線をまず鏡を使って機械的に捉え、それを光レバーで拡大し、CCD カメラで記録し、これを基に刃の接線を構成する一群の直線を求め、これらの直線群の包絡線から測定物の形状を再構築する方法が提案されている。両手法共に、これまで他の誰によっても試みられたことが無い独創的な方法である。

理論的な吟味が十分に行われているか： 鏡を使うことによる光学系の計算、レンズの全視野角の内のどの部分を使うかを決定するための収差に伴う誤差の計算、光レバーによる拡大率の計算、包絡線を求めるための数学的方法などが慎重に吟味されている。

提案の内容は実験によって確認されているか： Part 1、Part 2 ともに、その提案に基づいて実際に測定装置を設計し、製作している。これを使って多くの実験が行われており、その結果が詳しく述べられている。得られた結果はこれらの提案がすべて実用化可能であることを示すものである。ただし測定精度にはいまだ少し不足するところがあり、論文では、精度向上のために今後改善すべきところを解析し、一節を設けて論じている。

得られた結果は今後工業界にとって有用であるか： Part 1 で提案されている方法は、寸法ばかりでなく形状や色が測れること、非破壊試験であるため固体ばかりでなくゲルや液体も対象とすることができるなど、優れた特徴を有している。Part 2 で提案されている方法は、非破壊的に、オンラインで、かつ十分な精度で鋭い刃の形状を測定するという方法である。ともに工業界での応用を考えて始められたプロジェクトである。実際に製作したシステムは、すぐには生産ラインで使うことはできないが、その一歩手前の段階にあると考えられる。

## 最終試験結果の要旨

上記の申請論文の最終試験は主として公聴会によって行った。口頭発表の後の質疑応答では多くの質問や意見が述べられ、活発な討論が行われた。取り上げられた論点の主なものは以下のようであった。

Part 1 に関しては、このシステムを実現する場合に、鏡の傾き角をどのようにしてセットするか、どの程度の精度でセットできるか、その精度と測定精度との関連はどうかとの質問があった。これはこのシステムにとって重要な点である。このシステムを現実の生産ラインにセットする場合は、本実験で行ったような鏡を使った光学系は使用しない。鏡を使った場合には必ずヒンジを必要とすることとなり、そのセッティングには常にこの質問のような問題が発生するからである。そこで本研究では、鏡によるのではなく、多面体のプリズムを製作し、これを レンズ - CCD 系と一緒に強固な共通のステージに固定する方法を考えている。どのような形になるかについて、論文中の

概念図および発表に使用された図を再度引用してより具体的に説明した。

Part 2 に関しては、測定の対象物が一般の刃物や切削工具といったごく身近なものであるだけに、多くの質疑討論が行われた。まず過去に提案された二つの方法、刃先に光を当ててその反射光から刃先丸味を推定する方法と刃先にガラス板を載せてその傾きを光レバーで拡大する方法のどこが悪いかにについての説明が求められた。前者については、一般に工具や刃物の刃先は決して滑らかな面ではなく、反射光は広い範囲に拡散し、その拡散した反射光から元の刃先の形状を再現することはできないことを説明した。後者については、ガラス板は完全にフリーの状態であるため、刃先のごく先端部分だけが測れるだけであり、刃物メーカーでは使えないこと、また刃物の性能には刃先の丸味に続く部分の形状が大きく影響を及ぼすことを考えると、この方法は実用的ではないことが説明された。

Part 2 で提案されている二つの方法のうち二番目の一群の直線群の包絡線から刃先の形状を再構築する方法に関して、その精度の限界についての質問があった。現状での精度とそれを改善する方法は確かにあることは発表されたとおりであるが、この改善によって将来どこまでの測定精度を得ることができるかについては、理論的に予測することはできていないことが述べられた。将来実験によって確認することが必要であること、どのような鋭さの刃物まで使えるか、言い換えればどの業界にまで普及するかについての結論はそれから下されるべきであろうことで意見の一致をみた。

糸のような細い丸い物体の測定に本方法を応用することができるかについて、発表者の考えを述べることが求められた。これに対し、糸は微視的には殆ど端が無い物体であるため、Part 1 の方法も Part 2 の方法もともに無力であることが説明された。司会者からも同意する旨の発言があった。

以上の活発な質疑に対し、申請者は終始適切に応答し、論文の独創性を十分に訴えることに成功した。とくに、Part 1 の方法は、必要がない画像情報を捨て去ることに特徴があること、非破壊試験であるため固体ばかりでなくゲルや液体も対象とすることができることを、Part 2 では、この方法は完全に非破壊的にオンラインで測定できる方法であることを十分に説明できた。

なお、著者のこれまでの論文業績を審査した結果、本論文の内容はすでに二編の論文としてジャーナルに掲載され、さらにもう一編を投稿中であり、かつ海外で行われた国際会議で5編の論文として発表されていることを確認した。

以上によって、最終試験は合格と判定した。