



散乱光を用いたオンライン表面粗さ計測に関する研究

宮崎, 英一

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1993-03-31

(Date of Publication)

2015-05-19

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲1183

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3070629>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1001183>

※ 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)	みやざき えい いち 宮崎英一	(香川県)
博士の専攻分野の名称	博士(工学)	
学位記番号	博い第50号	
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当	
学位授与の日付	平成5年3月31日	
学位論文題目	散乱光を用いたオンライン表面粗さ計測に関する研究	

審査委員	主査 教授 岸本 工	
	教授 三好 旦六	教授 松本 治弥
	助教授 吉村 武晃	

論文内容の要旨

物体の表面粗さは、その表面特性を決める重要な要因の一つであり、表面の外観を与える光沢性、機械的な摩擦性、加工性などの性質に深く関わっている。品質管理の立場から、生産現場において表面の特性を制御する必要があり、そのためオンラインでの表面粗さ計測が不可欠な要素となっている。表面粗さを表す表面プロフィールはランダムなため、定量的に評価するには統計量で表現する必要がある。従って粗さを求めるには表面プロフィールを測定してもさらに統計処理を行う必要がある。これはオンライン測定の大きな障害となる。この欠点を除去するために積極的に研究されているのが光散乱法である。この方法は測定対象に光を照射し、その散乱光の性質から粗さを求める。この方法の特徴は照射領域の平均的な粗さが得られることからオンライン測定に適していることである。しかし、表面粗さは縦方向の粗さと横方向の粗さまたは平均的な傾きと横方向の粗さの組み合わせで表現される。このうち工業的に重要な粗さパラメータは縦方向の粗さまたは平均的な傾きである。しかし散乱光は回折現象により広がるため、検出される性質は表面の横方向の粗さに強く依存する問題点がある。そこで本研究では光散乱法のオンライン測定に対する利点を活かしながら、工業的に重要な粗さパラメータである縦粗さ R_s または平均傾き S を横方向の粗さから分離して測定することを目的とした。

第1章では一般的な触針式粗さ計と現在までに研究されてきた光散乱法のオンライン測定に対する問題点を調べ、本研究の位置づけを行った。

第2章では測定物体にレーザ光を照射し、それから放射される散乱光の角度分布から表面粗さを測定した。今までの表面粗さは、表面プロフィールが1種類の確率密度関数に従うと定義していた。しかしこれだけでは実際に得られる回折パターンを説明することが困難な場合がある。そこで本研究では

より高い近似を採用し、表面プロフィールが2種類の確率密度関数に従う2重粗さでの解析法を提案した。2重粗さは互いに独立なガウス統計に従う2つの表面プロフィールの重ね合わせから構成されていると定義した。そしてこの2重粗さを持つ表面から発生する散乱光の性質を解析し、それにもとづくオンライン測定法を考案した。測定対象を一般的な冷延鋼板としたとき、散乱光の回折パターンからその表面が2重粗さから構成されることが分かった。しかも触針式粗さ計で分離不可能な場合でも光散乱法を用いれば2重粗さのそれぞれのSを決定可能なことが分かった。この2重粗さの第1プロフィールのSは圧延に伴うダル加工により発生するものであり、第2プロフィールのSは圧延ローラの摩耗により発生することが分かった。解析した散乱光の性質から、その回折パターンを2重のリング状開口を同心円において測定するオンライン測定装置を開発した。この装置はそれぞれのリング開口を通して散乱光強度を同時に測定することで表面粗さの第2プロフィールのSの変化をモニタリングできることが分かった。このため光強度を測定するだけで圧延ローラの摩耗状態を知ることが可能となる。この測定装置は冷延鋼板の移動に伴う物体面と観測面の距離の変化や測定物体の傾きに影響を受けず、オンライン計測が可能であることを示した。

第3章ではスペックルパターン照射法を示した。測定物体にスペックルパターン照射し、物体から発生した散乱光が観測面に到達する。この散乱光のスペックル半径から表面粗さが測定可能となることを示した。この散乱光の強度相関関数を理論解析的に取り扱い、散乱光のスペックル半径と粗さとの関係を定量化した。散乱光のスペックルはスペックル半径の異なるスペキュラ成分と散乱成分から構成され、粗さによってその成分の光強度の割合が変化することが分かった。従ってこの散乱光のスペックル半径は表面粗さが粗くなるに従って減少し、スペックル半径から表面粗さが測定可能であることを示した。その結果、実験条件を変えて観測面上のスペックル半径を2回以上測定すれば縦方向と横方向の粗さの2つの粗さパラメータが決定できるので、 R_s のみを計測することが可能であることを示した。

第4章では散乱光の強度相関関数からスペックル半径を決定する代わりに、散乱光強度の揺らぎ量からスペックル半径を決定するモーメント法を考案した。短時間にモーメント値を得るためにはスペックル強度の揺らぎ量を2次元的に測定する必要がある。このため光学系を結像システムとし受光器にTVカメラを用い、各画素について独立にモーメント値を測定できる画像計測システムを製作した。これは $540 \times 480 \times 32\text{bit}$ の大容量フレームメモリを持ち、高速に演算を行う専用ハードウェアを備えている。この測定システムはモーメント値を高精度で計算するため、測定した散乱光強度をデジタル信号に変換してモーメント値を計算処理する。このためA/D変換に伴う量子化誤差が問題になるが、一般的な8bitのA/D変換器を用いても測定ダイナミックレンジを平均強度の5~7倍に取れば量子化誤差が3%以内で測定できることが分かった。このように平均強度に対する制約が緩いため本測定装置は2次モーメント値の画像計測が可能であることを示した。これを利用して、1フレームの測定で得たモーメント値から散乱スペックル径を決定できた。またこの画像計測システムで時間的に変化するダイナミックスペックルを照射し、各画素について時間的な平均操作を行うことで空間的な速度分布も測定可能であることが示された。これらの結果から、製作したモーメント画像計測シ

テムは正常に作動し、散乱光強度揺らぎの空間平均からはスペックル半径が、時間平均からもスペックル移動が決定可能なことが確認できた。

第5章では3章で述べた粗さ測定法を拡張し、4章で述べたモーメント測定システムを用いてオンラインで粗さ測定を行った。縦方向の粗さ R_s を測定する場合、測定物体に照射するスペックル半径、散乱スペックル半径と TV カメラの1画素の大きさの関係からモーメント値が縦方向の粗さだけに依存することが分かった。ゆえに1フレームの測定で得たモーメント値から縦方向の粗さのみが決定でき、 $6.01\text{nm} \leq R_s \leq 67.8\text{nm}$ の範囲がオンライン測定が可能であることを示した。また表面の平均傾き S を測定する場合、測定物体に照射するスペックル半径を散乱スペックル半径より十分大きくすれば、1フレームの測定からその値が一般的にスペックル半径より十分大きくすれば、1フレームの測定からその値が一般的に $2 \times 10^{-3} \leq S \leq 2 \times 10^{-1}$ の約2桁の広い測定範囲で決定できることがわかった。この画像計測システムを用い、ダイナミックスペックルを照射することにより縦方向の粗さや平均傾きの空間分布さえも測定可能である。

論文審査の結果の要旨

本論文は表面粗さを光学的方法によって短時間に計測する手法に関する研究成果をまとめたものである。表面粗さの測定には表面プロフィールを求める方法と粗さパラメータを直接求める方法とがある。粗さは統計量で表され、表面プロフィールを高精度に求めた後に更に統計処理し、粗さパラメータを求める必要がある。表面に光を照射し、その散乱光を測定する散乱法は非接触測定ができると同時に、光の照射領域の平均的粗さパラメータが直接求まる特徴を持つ。本論文はこの特徴を生かし、表面粗さを短時間に計測することを研究目的としたものである。散乱光を利用した粗さ計測法は、このような有利な点ばかりでなく大きな問題点がある。光の回折作用を利用するため、観測量には表面プロフィールの凹凸を表す縦粗さに横相関長（横粗さ）が重畳している。工業的に重要な粗さパラメータはこのうちの縦粗さである。この縦粗さのみを抽出することが困難であるため、光の散乱現象と回折作用とを利用した粗さ計測法は一般的に利用されていない。本論文はこの粗さパラメータの抽出法とオンライン計測を追求したものであり、次の二つの部分より構成されている。一つはコヒーレント光照明による光散乱法に関する研究である。他の一つは近年研究され始められた部分コヒーレント光（スペックルパターン）照明によるコントラスト法に関する研究である。

本論文の第1章は序論であり、第2章では光散乱法による手法について述べている。光散乱法は従来から良く研究されており、表面プロフィールが単純なモデルで置き換えられるとき、回折パターンから粗さパラメータを導出する理論的解析法はすでに確立されている。本研究においては、この解析法を2重粗さを持つ表面に対して適用した。表面プロフィール測定法では2重粗さの微細構造が判別できないときでも、光散乱法では明確に測定できることを示した。この結果の具体的応用例として、一般の製鉄所で製造されている冷延鋼板の粗さ測定をとりあげた。この鋼板表面はダル加工による粗さと調質用ローラの摩耗による粗さとの2重粗さを持っている。鋼板の品質管理上、ローラの摩耗による

粗さをオンライン計測する必要がある。これを実現するために散乱光強度をフーリエ面に置いた2重リング開口を通して検出する粗さ計測装置を考察した。つまり2つのリングの半径を最適化することにより、2つのリング開口の方向へ散乱した散乱光の強度比はガル加工による粗さにはほとんど依存せず、ロールの摩耗状態を表す粗さのみに強く依存することを示した。またこの光検出はフーリエ面内の光軸から外れた位置で行うため、鋼板の移動にともなう傾きや波うちの影響がないことも示した。これらの性質は高速移動する冷延鋼板をモニタリングするのに有効である。

コントラスト法による粗さ測定法に関する成果は第3～5章で述べている。コントラスト法による測定法はこれまでほとんど研究されておらず、本論文で初めて研究対象とされたと言える。したがって、本論文では、散乱光スペckルの粗さ依存性、短時間測定のための装置開発、粗さのオンライン測定法とその検出限界など基本原理から応用測定までを取り扱っている。

第3章ではスペckルパターンを物体に照射したとき、発生する散乱光のスペckルサイズが物体の粗さに依存する性質を Fresnel 回折理論を用いて詳しく解析し、散乱光強度の相関関係を導いている。この相関関数の性質から、散乱光のスペckルサイズは照射光のスペckルサイズから物体の横相関長の範囲まで変化し、表面の縦粗さと横粗さとに強く依存することを定量的に示した。このことは散乱光のスペckルサイズの測定から粗さパラメータを決定するには実験条件を変えて2回測定する必要があることを意味する。2回測定することにより、縦粗さと横粗さとの粗さパラメータを分離して測定できることを示した。この結果、光の回折作用を利用した粗さ測定法では縦粗さと横粗さを分離して測定できないとされていた最大の欠点を解消した。

第4章では短時間に高精度でスペckルサイズを測定するモーメント計測装置の開発を扱っている。第3章ではスペckルサイズは空間的に変動する光強度の相関関数から求めた。この測定法は一般的方法であるが、短時間計測を実現するという観点から問題がある。これに代わる方法として、スペckル強度揺らぎを有限開口の光検出器で検出し、その揺らぎの2次モーメント値を測定すればスペckルサイズを決定できるというモーメント法を考案した。この方法におけるモーメント値もまた統計量であるので、データの統計処理を高速に行う手法として光検出器に TV カメラを使用し、空間平均を短時間で行うことにより、モーメント値の短時間計測を実現した。さらにモーメント値を高精度に得るため、A/D変換器の量子化誤差を検討し、8-bit のA/D変換器を用いるときは、入力光の平均強度を量子化レベルで35～50程度に設定すれば、数%の精度でモーメント値が得られることを示した。そして、ここで構成した装置を利用すれば、速度の空間分布も測定可能であることも示した。

第5章ではコントラスト法による粗さパラメータのオンライン測定法について述べている。求める粗さパラメータは縦粗さまたは表面プロファイルの平均傾きである。モーメント値は粗さに依存するが、粗さパラメータを決定するには実験条件を変えて2回測定する必要がある、オンライン計測に大きな障害となる。この欠点を取り除くため測定物体にスペckルを照射し、その散乱スペckル強度を有限開口の光検出器で検出するという前提条件のもとで、モーメント値の粗さ依存性を詳しく解析した。この結果、実験条件さえ満足すれば一つのモーメント値から粗さパラメータが一義的に決定できるこ

とを示した。この条件を満足する光学系を構成し、モーメント計測装置を利用して、粗さ測定を行った。TV カメラの1フレームのデータから縦粗さまたは平均傾きの粗さパラメータを数%の精度で決定できることを示した。これにより表面が空間的に定常であるならばオンラインで粗さパラメータが決定できる。さらにこの測定法はオンライン測定を犠牲にするならば、粗さパラメータの空間分布をも決定できることも示した。

以上のように、本論文は従来は不可能と思われていた散乱光を用いる表面粗さ計測法がオンライン計測にも適用可能であることを示し、新しい計測法を考案した。これらの成果は表面粗さ計測技術の発展に寄与すること大であるとみとめ、また、光学的手法による表面粗さ計測の実用化に大きく貢献する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、論文提出者 宮崎英一は博士(工学)の学位を得る資格があると認める。