

学 位 論 文 題 名

鉄鋼製造プロセスにおける検査技術の自動化に関する研究

学位論文内容の要旨

わが国の鉄鋼業は1973年に発生した第1次オイルショックを契機として、工程の連続化、高速化、高品質化、省力化および省エネルギーの研究開発を行い、世界第1位の生産量と品質を確保してきた。しかしながら、鉄鋼業を取り巻く環境は発展途上国を中心とした諸外国からの輸入鋼材との競争の激化、需要家からの高品質に対する要求の高まりなど、厳しさを増している。一方では昨今の労働情勢の悪化によって、労働力の確保は困難さを極めている。このような状況下において、さらに製造コストを極限まで引き下げ、高品質の製品を製造することが、わが国の鉄鋼業に課せられた課題である。この目的を達成するためには、さらに工程の連続化を行うことにより、省エネルギーと省力化を行い製造コストを引下げ、各工程での検査を自動化することによって、製品の高品質化と省力化を達成することができるが、最大の阻害要因は各工程での非効率で不適切な表面疵検査であった。また、出荷検査においても、各種の検査の自動化を積極的に推進してきたが、目視検査については未だ自動化されず、その開発が急務であった。以上の目的を達成するため、鉄鋼製造プロセスにおける品質検査技術の中で、重要な位置を占めるインライン表面疵検査技術の自動化および出荷検査技術の自動化について研究開発を行った。従来の出荷検査技術における目視検査の結果と自動化後の検査結果とを整合させるため、対象物の特性を多数の試験片を用いて解析し、個々の計測対象物に適切な手法を選択して自動化技術を研究開発した。本論文は全部で6章からなり、各章の概要は次の通りである。

第1章は序論であり、鉄鋼業を取り巻く環境と課題、鉄鋼業における計測制御技術の役割および現状の問題点を明確にした。鉄鋼業では諸外国、特に発展途上国からの輸入鋼材に対抗し、需要家の高品質化に対する要求と、労働情勢の悪化に伴う人手不足に対処するため、徹底した製造コストの削減と高品質化および省力化が要求されており、これに対応

するための検査技術の自動化について詳細に検討を行った。最後に全体を通しての本論文の構成を紹介した。

第2章は熱間鋼材の表面疵検査技術の自動化開発のうち、熱間スラブ表面疵検査技術の自動化に関するものである。熱間スラブの表面疵の特徴はスラブは低速で搬送され、疵の開口幅は非常に小さいが、深さが深いという特徴がある。したがって、電磁気的な探傷方法が有効であるものの、疵以外の雑音成分が大きく、従来、この方法の実用化が困難とされてきた。本研究では雑音の要因を明らかにするとともに、熱間スラブの表面に近接配置された検出コイルのインピーダンスを解析して、雑音が最も抑制される励振周波数を求めた。さらに、雑音を抑制するために、疵成分と雑音成分の方向性に着目した新しい検出コイルを開発することにより、電磁気的に不安定な温度領域と表面形状が不均一な熱間スラブの表面疵検査技術の自動化技術を開発した。また疵の検出範囲は横方方向疵ではスラブ両端の400 mm、縦方向疵では中央部の1200 mmである。この範囲の疵を検出するため全部で156個の検出コイルを疵と直交する方向に配置した。その性能は疵深さ3 mm以上で長さ10 mm以上の疵を100%検出することが可能で、高級鋼の製造技術の向上、省エネルギーおよび歩留まりの向上に寄与した。

第3章では熱間鋼材の表面疵検査技術の自動化開発のうち、熱間形鋼表面疵検査技術の自動化開発に関するものであり、本論文中でオリジナリティの高い部分である。形鋼表面疵の特徴は、ある程度の面積を持っているが、その深さは浅く、また、その搬送速度は極めて速い。したがって、疵を検出する方法として、非接触な光学的手法が適当であり、熱間鋼材が発する輻射光を受光する自発光受光方式を採用した。この方法は疵部とその周辺に発生する温度差に着目して、疵を検出する方法である。従来、この方法では、検出素子として赤外線受光素子を用いていたが、この波長領域では、温度差を顕著に検出することができなかった。この原因を明確にするために、シミュレーションを行って可視域で、適切な検出波長領域を明確にし、さらに実験的に確認した。また、断面方向に有する温度差を光学的に補正するための光量減衰器を開発した。この減衰器は数種類の形状の形鋼に対し、1個の形状で対応可能であることが判明した。この研究開発によって、従来の目視検査を自動化し、省力化および製品の品質の向上に大きく寄与した。

第4章は出荷検査技術の自動化開発のうち、ビッカース硬度自動測定技術に関するもの

で、オリジナリティの高い部分である。ビッカース硬度は正四角錐の形状のダイヤモンド製の圧子を一定荷重で被検査材に押付け、そのとき発生する圧痕の対角線の長さから、硬度を算出する方法である。このとき得られる圧痕の大きさは通常、数 μm ～数百 μm であるから、対角線は顕微鏡を用いて測定される。そのため、作業者の疲労が大きく、かつ測定結果の個人差も大きい。そこでビッカース硬度検査技術の自動化は必須の要件であった。この問題を解決するために、多数の圧痕を詳細に観察した。その結果、まず圧痕の稜線の方程式を求め、これらの交点を圧痕の頂点座標とし、さらに目視検査の方式に近い方法で補正した。また最適な2値化レベルの決定は輝度ヒストグラムをパターン化して、登録されたデータと照合する方法を開発した。本開発によって従来、不可能とされてきた鏡面仕上げ以外の腐食処理面、粗研磨面の試験片でも高精度で測定可能となった。

第5章では出荷検査技術の自動化開発のうち、非金属介在物検査技術の自動化開発に関するものである。この作業は前記と同様に顕微鏡を用いて行う作業である。鉄鋼製品の中で最も介在物の検査基準の厳しいものはスチールコード用線材である。スチールコードは直径 5.5 mm ϕ の線材を 0.15 ～0.38 mm ϕ に高速伸線して製造される。このとき硬質系の介在物が存在すると伸線中に線材が破断するばかりでなく、強度の低下をきたす。したがって、線材中の介在物は厳格に検査する必要がある。検査方法は、すでにミシエラン法等に規定されており、この規定を忠実に守ることが要求される。この規定によれば、対象とする介在物の大きさは 5 μm 以上で視野数は試験片1個あたり 265である。また、目標の検査時間は目視検査の1/3 に相当する15 分間である。この問題点を解決するためには、種々の介在物の中から硬質系介在物だけを選択し、高速で 5 μm 以上の介在物の寸法を測定することが要求される。これを達成するため、画素密度の高い画像処理装置を用い、高速処理を行う手順を開発した。この結果、スチールコードの検査体制を確立し、製品の安定化と省力化に貢献した。

第6章は結論であり、各章を通じて結論をまとめた。本研究では各々の課題に最適な方法を検討し、検査技術の自動化開発を行った。検査の自動化は省力化だけに止まらず、製造期間の短縮による金利負担の減少、製品の高品質化による競争力の強化、工程の連続化による省エネルギーなどその効果大きい。また将来の課題についても言及した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 塚 喜 弘
副 査 教 授 大 場 良 次
副 査 教 授 斎 藤 勝 政
副 査 教 授 成 田 敏 夫

学 位 論 文 題 名

鉄鋼製造プロセスにおける検査技術の自動化に関する研究

近年、鉄鋼製造プロセスの省力化および省エネルギー化を図ることにより、鉄鋼製品の高品質化と徹底したコストの低減化が最重要課題となっている。とりわけ、鉄鋼製造プロセスにおいて生ずる熱間鋼材の表面疵の自動検査技術および自動出荷検査技術の実用化が強く要請されている。このような背景のもとで、本論文は、鉄鋼製造プロセスの検査技術の自動化に関して行った研究を取り纏めたものである。

第1章は序論であり、鉄鋼業を取り巻く環境と課題、鉄鋼業における計測技術の役割および現状の問題点を明確にしている。鉄鋼業では徹底した製造コストの削減と高品質化および省力化が要求されており、これに対応するための検査技術の自動化について詳細に検討を行っている。

第2章は、熱間スラブ表面疵検査の自動化技術に関して述べている。熱間スラブの表面疵は、スラブは低速で搬送され、疵の開口幅は極めて狭いが、疵が深いという特徴がある。したがって、電磁気的な検査方法が有効であるものの、疵以外の雑音成分が大きく、従来、この方法の実用化が困難とされてきた。そこで、これを実用化するために、熱間スラブの表面に近接配置された高周波コイルのインピーダンス解析を行って、雑音が最も抑制される励振周波数を求めた。さらに、雑音の抑制可能な新しい検出コイルを開発することにより、安定した検出性能を確保することができた。その性能は深さ3 mm 以上で長さ10 mm 以上の疵を100 % 検出することが可能であり、高級鋼の高品質化、省エネルギー化および歩留まりの向上に寄与した。

第3章は、熱間形鋼表面疵検査の自動化技術に関して述べている。形鋼表面疵の特徴は、ある程度の面積を持っているが、その深さは浅く、また、その搬送速度は極めて速い。したがって、疵を検出する方法として、非接触測定可能

な光学的手法が適当であり、熱間鋼材の発する熱放射光を受光する方法を採用した。この手法は、疵部とその周辺に発生する温度差に着目して、疵を検出する方法である。従来、この方法では、検出素子として、赤外線受光素子を用いていたため、検出性能が不十分であった。その原因が検出器の分光感度特性に依存することを明らかにし、疵を顕著に検出できる波長領域の検出器を用いることによって、信号のS/Nを大幅に改善できた。また、光束の断面方向に生ずる温度差を光学的に補正するための光量減衰器を開発した。本開発によって、従来の目視検査を自動化することに成功し、省力化および製品の高品質化に大きく寄与した。

第4章は、出荷検査の自動化技術の開発として、ビッカース硬度検査の自動化技術に関して述べている。ビッカース硬度は、正四角錐の形状のダイヤモンド製の圧子を一定荷重で被検査材に押し付け、そのとき発生する圧痕の対角線の長さとし、押し付け荷重の大きさから、硬度を算出する方法である。そのとき得られる圧痕の大きさは、一般に、小さく、かつ、圧痕以外の画像の雑音要因が大きい。そこで、対角線長さの測定方法について、まず圧痕の稜線の方程式を求め、これらの交点を圧痕の頂点座標とし、さらに、補正方法を考案した。また、最適な2値化レベルの決定方法のために、新しい輝度ヒストグラム法を開発した。本開発により、従来、不可能とされてきた鏡面仕上げ以外の試験片でも、JIS規格を十分満たす測定が可能となった。

第5章では、出荷検査の自動化技術の開発として、非金属介在物検査の自動化技術に関して述べている。鉄鋼製品の中で、介在物の検査基準の最も厳しいものはスチールコード用線材である。スチールコードは直径5.5 mmφの線材を高速伸線して製造される。線材中に、硬質系の介在物が存在すると、強度の低下をきたす。そこで種々の介在物の中から、有害な硬質系介在物だけを選択して、5 μm以上の介在物の寸法を高速で測定することが要求される。これを達成するため、画素密度の高い画像情報処理装置を用い、高速処理法の開発を行うとともに、その手順を設定して、スチールコード用線材の品質の均質化と省力化に貢献した。

第6章は、本論文の総括である。新しく開発された鉄鋼製造プロセスにおける種々の検査技術の自動化が鉄鋼製品の高品質化とコストの低減化に大きく貢献したことをのべるとともに、今後の研究課題についても言及した。

これを要するに、著者は鉄鋼製造プロセスにおいて、熱間鋼材の表面疵検査技術および出荷検査技術の自動化と実用化に成功したものであり、計測工学および金属材料工学の分野に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。