学位論文題名

法線ベクトル検出による形状測定と評価法に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は、法線ベクトル検出プローブを提案・試作し、同プローブシステムを CNC 三次元座標測定機に組み込み、測定点の位置ベクトルと法線ベクトルを直接検出することを可能とする測定システムを構築することにより、位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく形状測定を評価法として、機械部品基礎形状の測定評価法、自由曲面加工形状の測定評価法、自由曲面計算機モデルの構築法について提案している。本論文は7章から成り立っており、各章は以下に示す内容となっている。

第1章は、緒論を述べている。研究の背景として、三次元座標測定機の普及と従来の三次元座標測定機による測定の問題点を指摘している。従来の問題点を解決するため、測定点の位置ベクトルと法線ベクトルの直接検出を可能とする測定システムを開発し、同測定システムを基にした機械部品基礎形状の測定評価法、自由曲面加工形状の測定評価法、自由曲面計算機モデルの構築法を提案することを研究の目的としている。また、位置ベクトルと法線ベクトルの検出法、機械部品基礎形状の測定評価法、自由曲面加工形状の測定評価法、自由曲面計算機モデルの構築法に関する従来の研究と問題点を明らかにしている。さらに、本論文の概要を述べている。

第2章は、法線ベクトル検出プローブについて述べている。測定点の法線ベクトルを直接検出する接触式プローブを提案し、その検出原理を明らかにしている。同プローブは、絶縁セラミック球表面に抵抗薄膜と4つの電極を形成した極めて単純な構造となっている。プローブと被測定物の接触により、球面抵抗薄膜、電極、被測定物、定電流電源により定電流回路が形成される。このとき、接触点(測定点)から各電極に流れ込む電流は、接触点と各電極間の抵抗値に反比例しているため、電極に流れ込む電流値を検出することにより法線ベクトルを検出できる。また、計算機シミュレーションにより、提案したプローブの設計を行い、同設計に基づき基礎プローブの試作を行っている。試作された基礎プローブの直径は、30.2mmであり、球面抵抗薄膜はNi-Crにより形成された。測定時にプローブから得られるデータは、球面抵抗薄膜上に形成された電極に流れ込む電流値に等価な電圧値であるため、同電圧値を用いて法線ベクトルを算出(内

挿)するためのアルゴリズムを提案している。さらに試作した基礎プローブを用いて鋼球の測定実験を行い、検出原理と法線ベクトル算出アルゴリズムの確認を行うとともに、基礎プローブの法線ベクトル測定精度が極座標表示で θ 、 ϕ 方向ともに $\pm 0.7^\circ$ であることを明らかにしている。

第3章は、位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムについて述べている。実用プローブに要求される仕様として、位置ベクトル測定精度が $\pm 10\mu\text{m}$ 以下とすることを基に検討した結果、プローブ球直径は10mm、法線ベクトルの測定精度は θ 、 ϕ 方向ともに $\pm 0.1^\circ$ とし、球面抵抗薄膜は耐磨耗性の高い材料により形成することとした。このため、直径10mmの石英ガラス球表面に耐磨耗性材料であるTiNにより抵抗薄膜を形成し、実用プローブの試作を行った。同プローブを基にした法線ベクトル検出プローブシステムとCNC三次元座標測定機を組み合わせ、位置ベクトルと法線ベクトル測定システムを構築した。さらに基礎実験により、同測定システムの法線ベクトルの測定精度が θ 、 ϕ 方向ともに $\pm 0.1^\circ$ であることを明らかにした。

第4章は、機械部品基礎形状の測定評価法について述べている。構築した位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムを用いた応用計測(その1)として、機械部品の主要な構成要素である平面、円筒、球の位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく測定評価法の提案を行っている。同時に、従来の位置ベクトル検出に基づく平面、円筒、球の測定評価における問題点を明らかにし、提案した測定評価法との比較を行っている。また、提案した測定法は、従来の測定法と比較し2~3倍の測定効率が得られることが明らかにされている。構築した測定システムを用いて平面、円筒、球の測定評価実験を行い、測定精度について検討し、提案した測定評価法の有効性・実用性を確認している。

第5章は、自由曲面加工形状の測定評価法について述べている。構築した位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムを用いた応用計測(その2)として、自由曲面加工形状の測定評価法の提案を行っている。提案の中で、自由曲面加工形状の測定評価における基本的考え方を明らかにしている。また、自由曲面を意匠曲面と機能局面に分類し、それぞれの局面に対する評価項目として、意匠曲面の場合は法線ベクトル、機能曲面の場合は位置ベクトルとすることを示している。設計形状から加工形状への写像を座標変換としてモデル化し、加工形状の評価と座標変換の関係を明らかにするとともに、従来自由曲面加工形状の評価法として採用されているベストフィット法と提案した評価法との比較を行い、その違いを明らかにしている。また、測定評価の基本的考え方を実現するための評価手順を提案し、計算機シミュレーション実験により、提案した評価手順の有効性を確認している。

第6章は、自由曲面計算機モデルの構築法について述べている。構築した位置ベクトルと法線

ベクトルの測定システムを用いた応用計測（その3）として、位置ベクトルと法線ベクトルに基づく自由曲面加工形状計算機モデル構築法の提案を行っている。従来の曲面パッチ定義式は、パッチコーナー点の位置ベクトル、接線ベクトルおよびねじれベクトル、あるいはこれらのベクトルに等価な制御点を必要としていた。したがって、物理モデルの観測データを直接用いて計算機モデルを構築することが困難であり、その構築が容易ではなかった。この問題を解決するため、位置・法線ベクトル測定システムにより得られる測定点の位置ベクトルと法線ベクトルの観測データを直接用いて計算機モデルを構築するための曲面パッチ定義式を提案している。また、同曲面パッチにより構築される計算機モデルの曲面パッチ間の位置ベクトルと接線ベクトルの連続性について数式的に証明するとともに、切削加工により連続する複数の局面パッチの加工面（物理モデル）を形成し、その観察からパッチ間の接続状態が滑らかであることを確認している。

第7章は、本論文のまとめを示している。

学位論文審査の要旨

主査	教授	岸浪建史
副査	教授	斎藤勝政
副査	教授	池田正幸
副査	教授	鶴飼隆好

本論文は、形状測定における測定値として従来の位置ベクトル検出に加え法線ベクトル検出の必要性とその利点を指摘し、法線ベクトルを検出するためのプローブの原理と設計法を示すとともに同プローブの試作を行い、それを用いた形状測定法と評価法に関する研究成果を取りまとめたものである。本論文は7章から成り立っており、各章の主な内容と成果は以下のとおりである。

第1章は緒論であり、三次元座標測定機の普及と従来の三次元座標測定機による測定の問題点を指摘し、本研究の背景と位置づけを明確にするとともに、本研究の目的と論文の構成の述べている。

第2章では、測定点と法線ベクトルを直接検出するためのプローブを提案し、その検出原理を明らかにするとともに、計算機シミュレーションにより設計を行い、検出原理を確認するための基礎プローブの試作を行っている。同プローブはセラミック球表面に抵抗薄膜と4端子を形成し

た単純構造となっており、定電流電源を介して被測定物と接続されている。プローブと被測定物の接触に伴い接触点（測定点）から各電極に流れ込む電流値より接触点位置、すなわち法線ベクトル方向を検出している。また、測定電流値から接触点位置を同定するためのキャリブレーション方法と法線ベクトルを算出（内挿）するためのアルゴリズムを提案している。さらに試作した基礎プローブを用いて鋼球の測定実験を行い、検出原理と法線ベクトル算出アルゴリズムの確認を行っている。

第3章では、実用的プローブ仕様として、プローブ球直径は10mm、位置ベクトル測定精度は $\pm 10\mu\text{m}$ 、法線ベクトルの測定精度は θ 、 ϕ 方向ともに $\pm 0.1^\circ$ 、球面抵抗薄膜は高耐磨耗性を有することを要求し、この要求に基づき、直径10mmの石英ガラス球表面に耐磨耗性材料であるTiNを蒸着して実用プローブの試作を行っている。また、同プローブとCNC三次元座標測定機を組み合わせ、位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムを構築し、基礎実験により、同測定システムの法線ベクトルの測定精度が θ 、 ϕ 方向ともに $\pm 0.1^\circ$ であることを明らかにしている。

第4章では、機械部品の主要な構成要素である平面、円筒、球の位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく測定評価法の提案を行っている。同時に、従来の位置ベクトル検出に基づく平面、円筒、球の測定評価における問題点を明らかにし、提案した測定評価法との比較を行っており、提案した測定法は従来の測定法と比較して2～3倍の測定効率が得られることを明らかにしている。また、第3章で構築された測定システムを用いて平面、円筒、球の測定評価実験を行い、測定精度について検討し、提案した測定評価法の有効性・実用性を確認している。

第5章では、自由曲面加工形状に対する測定評価の基本的考え方を明らかにし、使用目的から自由曲面を意匠曲面と機能曲面に分類し、意匠曲面の場合は法線ベクトルを、機能局面の場合は位置ベクトルを評価基準とすることを示している。また、設計形状から加工形状への写像を座標変換としてモデル化し、加工形状の評価と座標変換の関係を明らかにするとともに、従来自由曲面加工形状の評価法として採用されているベストフィット法と提案した評価法との比較を行い、その違いを明らかにしている。さらに測定評価の基本的考え方を実現するための評価手順を提案し、計算機シミュレーション実験により提案した評価手順の有効性を確認している。

第6章では、位置ベクトルと法線ベクトルに基づく自由曲面加工形状計算機モデルの構築法の提案を行っている。すなわち、従来の曲面パッチ定義式の問題点として、物理モデルの測定データを直接用いて計算機モデルを構築することが困難であることを指摘し、この問題を解決するため、第3章で構築された測定システムにより得られる位置ベクトルと法線ベクトルを直接用いて計算機モデルを構築する曲面パッチ定義式を提案している。また、同曲面パッチ間の位置ベクトル

ルと接線ベクトルの連続性について数式的に証明するとともに、切削加工により加工面（物理モデル）を形成し、その観察からパッチ間の接続状態が滑らかであることを確認している。

第7章は結論であり、論文全体のまとめを述べ成果の統括を行っている。

以上のように本論文は、工業製品の形状測定と評価法に、独自の方法論を提案し、実際にその有効性を確認したものであって、計測工学および精密工学に寄与するところが大きい。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。