磁力センサを取り付けたロボットによる 曲面倣い制御*

国枝正典** 中川威雄***

Robot Contouring of Curved Surface with Magnetic Force Sensor

Masanori KUNIEDA and Takeo NAKAGAWA

This paper describes the proposal of a magnetic force sensor which enables a robot to follow a 3-D curved surface. The magnetic force sensor has a permanent magnet at one probe end and a three axial dynamometer at the other end. Since the magnet is attracted in the normal direction of the surface, which of course must be ferromagnetic; the inclination of the sensor axis from the normal can be detected by measuring the components of the off-axial force. Therefore, the robot can direct the sensor axis in the normal. Then the displacement from the surface can be obtained using the relation between the displacement and the attraction force which is now on-axial. In this way, the robot can follow the curved surface with the sensor axis normal to the surface, keeping the sensor end a constant distance away from the surface. In the present work, characteristics of the sensor are investigated, and measurement of a surface contour is tried using an articulated robot installed with the magnetic force sensor.

Key words: magnetic force sensor, 3-D curved surface, permanent magnet, three axial dynamometer, normal direction, contouring control of a robot, measurement of a surface contour

1. 緒 言

複雑な三次元曲面を持った製品が増えるとともに曲面を対象とした切削、研磨、溶接、ビーム加工、組立、検査、塗装などの工程が、3軸以上の工作機械やロボットを用いて次々と自動化されている。例えば板金成形品のレーザ切断ではビームを板金面に垂直に当て、しかも焦点位置のズレが無いように板金との距離を一定に制御する必要がある。特に板金のスプリングバックなどで形状データとの微妙な相違が存在する場合には、法線と変位を同時に検出可能なセンサが必要となる。また、ロボットなどは機械自体の精度が劣るので、センサを使って運動軌跡を修正する必要がある。

曲面の法線と位置を同時に検出するには、単純には3本の変位センサを三角形の頂点に配置し、各センサの出力が等しくなるようにすればよい。Hanafusa ら¹⁾

が非接触変位センサを進行方向に2本並べロボットによる二次曲面の倣い制御を行った例はその原理の応用だが、センサ頭部が大きくなるので倣い精度は良好とは言えない。2本のセンサを並べる代わりに1本のセンサを接平面に平行に移動し、前後の変位から法線を検出しながら二次曲面に倣ってロボットを制御した Ando ら²⁾の例も原理的には同じであろう。次に、光学式のセンサとしては、受光素子に対して非対称におかれた発光素子の発光パワーを二相信号で変化させ、受光反射信号の位相変化で位置と傾きを求める増田ら³⁾の方法、受光用レンズの光軸上で90°に交わる2本の光線の測定面上の光点を受光レンズで結像し、その位置関係から測定した後藤ら⁴⁾の方法等がある。これらの光学的な方法は測定面の反射率が測定精度に影響する上、装置が概して大型になる欠点がある。接触式のセンサとしてはプローブが測定面に接触した瞬間の抗力の3分力を3つの圧電素子を用いて測定する多田ら⁵⁾の方法や、同じ抗力の3分力をテーパー対向形静圧空気軸受の3方向の変位により検出する幸田ら⁶⁾の方法などがある。しかし接触式センサは測定面との摩擦が測定精度に影響を及ぼすことや、曲面に沿った連続測定が困難であるという欠点がある。

* 原稿受付 昭和62年2月17日。昭和59年度精機学会春季大会学術講演会(昭和59年3月25日)および昭和60年度精機学会春季大会学術講演会(昭和60年3月29日)にて発表

** 正会員 東京農工大学工学部(小金井市中町2-24-16)

*** 正会員 東京大学生産技術研究所(東京都港区六本木7-22-1)

Fig. 1 Schematic view of the magnetic force sensor

そこで本報では、磁石が測定面の法線方向に吸引される現象を利用して、測定面の汚れや表面粗さに影響されず法線と変位を非接触で検出可能な磁力センサを新たに考案し、ロボットによる曲面微い制御を試みた。

2. 磁力センサの原理と構造

磁力センサの原理は、異なる磁性体の不連続境界面に働く応力が面に垂直な成分のみを有する⁷⁾ことを利用し、永久磁石が強磁性体の測定面の法線方向に吸引される力を3分力計により測定し、曲面からの距離と傾きを検出するものである。

磁力センサは図1に示すようにアルミニウム合金で作った3分力計の先端に円盤状の永久磁石が接着された構造を持っている。永久磁石は直径8mm、厚さ2mmの希土類磁石(HICOREX)であり、着磁は厚み方向にしてある。3分力計としては谷ら⁸⁾の提案による、製作が容易で高剛性、優れた方向分離性を備えた円孔ロードセルを用いた。センサ座標系をxyzとすると、磁気力 $\vec{F}$ のセンサ軸方向の分力 F_z はひずみゲージ①～④によって検出され、曲げ力 F_x は⑤と⑥、 F_y は⑦と⑧によって検出される。但し、曲げ力については①と②のゲージのように円孔の片側に貼るのが本来の円孔ロードセルの方法である。それは力の作用点が移動しても純粋にせん断力だけを分離検出できるからである。しかし磁力センサの場合は作用点がプローブの先端に固定されて動かないのと、円孔の両側に貼ればプローブが長いほど感度が向上し、図の寸法では両側に貼った方が感度が良かったことから図のような貼り方を採用した。

図2のように永久磁石が測定面から受ける磁気力の

Fig. 2 Schematic view of the magnetic force applied to the magnet

ベクトル $\vec{F}$ の方向をセンサ座標系xyzにおいて α, β で表現すると、3分力と α, β の間には、

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{F_x}{F_z} \quad (1)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{F_y}{F_z} \quad (2)$$

なる関係が成立する。一方、磁気力 $\vec{F}$ と法線 $\vec{N}$ のベクトルの方向は一致することから、この2つの式により法線が検出できる。2つの式には測定面とプローブの間隔 L が含まれていないので、 L の値にかかわらずセンサ先端を中心にセンサ軸を傾け、センサ軸を法線に一致させることが可能である。いったんセンサ軸が法線に向けば、間隔 L と軸方向分力 F_z との間には一定の関係が成立するので、 F_z より曲面との距離を検出できる。

3. 磁力センサの基本特性

3.1 傾き角特性と変位特性

図3に示す実験装置を用いてセンサの基本特性を調べた。磁力センサは固定され、測定物はXYテーブル上の回転テーブルに載せられていて、手で平行移動や回転移動を行い静的な諸特性を調べることができる。

平板の法線からセンサ軸をセンサ座標系x方向に α (deg) 傾けると、前章の式(1)のように3分力計の出力から計算した $\tan^{-1}(F_x/F_z)$ は α に一致しなければならない。その関係を図4に実線で示す。一方、点でプロットしたのが $L=1$ mmの時の実測値であり、 α が比較的小さいときは測定精度はかなり良いことが分かる。

いったんセンサが法線に向けば間隔 L と軸方向分

Fig. 3 Testing instrument for output characteristics of the magnetic force sensor

Fig. 4 Calibration curve used for measurement of the inclination angle. The angle of inclination α can be obtained from the equation; $\alpha = \tan^{-1}(F_x/F_z)$

力 F_z の間には図5に示す一対一の関係がある。この図で例えば F_z を 0.85 N から 1.00 N の間に保てば、測定面との間隔は 2 mm を中心に ± 0.1 mm の範囲で一定に保つことができる。

3.2 測定物の板厚及び鋼種の影響

鋼板のレーザ切断に磁力センサを応用する場合を考えると、板厚の小さいときは鋼板中の磁束密度が飽和してセンサの出力が低下する。前節の図5のようにセンサ出力は永久磁石が測定面に密着する瞬間に最大となるので、変位 $L \approx 0$ の時の最大出力を縦軸に、鋼板（磨き帯鋼板 SK 5）の板厚を横軸にとって板厚がセンサ出力に及ぼす影響を調べると図6のようになる。板厚 0.8 mm 以上ならば出力に違いはないことが分かる。

次に、鋼種による出力の違いを見るため板厚 15 mm の純鉄と鋳鉄で変位特性を比較した結果、磁束密度が飽和していないせいか全く相違は見られなかった。ところが板厚 0.67 mm で比べると出力の最大値で純鉄

Fig. 5 Relation between L and F_z in case that the axis of the sensor is directed normal to a flat surface

Fig. 6 Influence of the saturation of magnetization of specimen upon sensor output in accordance with the reduction of specimen thickness

の方が 20% 大きかった。以上より板厚 0.8 mm 以上の鋼板ならば鋼種によらず一定の特性を維持できることが分かる。

4. 磁力センサの測定精度

回転テーブル上の試料の R 10 のコーナ部を磁力センサを用いて形状測定した。まず XY テーブルの目盛を変えてセンサを測定面に平行に微小距離移動させ、その位置で曲げ方向分力 F_x が零になるように、かつ軸方向分力 F_z が設定値 F_0 を保つように、手で XY テーブルのマイクロメータヘッドの目盛と回転テーブ

ルの角度目盛を調節する。そして、調節後の各目盛の値からセンサの測定面に対する傾きと距離を計算し、図7に示すようにセンサの刻々の位置を記録した。線分はセンサ軸を、線分の測定面側の端点は永久磁石の端面の中心を表す。測定面の曲率半径10 mmと比較して磁石径が8 mmと大きいので、磁石に対向した測定面の距離と傾きの平均値を測定することになる。例えばB点では図のように磁石の半分はR10のコナ部に、残り半分は平坦部に対向しているので、曲げ力 F_x を零に維持するにはB点での実際の法線方向よりも平坦部側へセンサ軸を多少傾ける必要がある。図8(a)にA点からの弧長 S をパラメータに変位の誤差 ΔL と傾き角の誤差 $\Delta\theta$ をプロットした結果を示す。曲率の大きく変化するA点とB点において $\Delta\theta$ が大きくなり、A点とB点の間で ΔL が最大となることが分かる。

そこで、曲率半径が磁石直径より比較的大きなR35のコナ部を測定し、測定面に沿った誤差 ΔL と $\Delta\theta$ を求めた結果を図8(b)に示す。 S は同じくコーナの導入部を起点とした弧長である。図8(a)に比べてかなり測定精度がよいことが分かる。逆に図9はR0のコナ部の測定結果である。磁石径が大きいのでセンサ先端位置を結んだ測定形状には大きなRがついてしまう。

Fig. 7 Static measurement of 2-D curved surface with the magnetic force sensor

(a) In the case the corner R equals 10mm

(b) In the case the corner R equals 35mm

Fig. 8 Error of measurement

Fig. 9 Measurement of corner shape whose radius of curvature is zero

5. 磁石径が測定精度に及ぼす影響

センサ頭部が針状で、かつ測定面に十分接近していれば、磁界の広がりや測定面上のある点近傍に限定されるので測定精度は向上する。そこで、同じ構造で磁石の直径を8 mmから3 mmにした小型の磁力センサを試作し、図7に示したのと同じR10 mmのコナ部の倣い精度を比較した。磁石径が小さいと吸引力も減少するので、3分力計は3 mm角のものを製作して

Fig. 10 Measurement of the Z component and the inclination of the surface along the function $Y=f(X)$

感度を上げた。また、大きな吸引力が得られるように、測定面との間隔 L も接近させて 0.5 mm とした。その結果 8 mm 径に比べ ΔL は 1/4、 $\Delta\theta$ は 2/5 に減少し、測定精度が大きく向上した。このように測定面の曲率半径に比べてセンサ径を十分小さくすれば理論上はいくらでも測定精度は向上する。しかし、磁石の断面積と吸引力はほぼ比例するので断面積が減少しただけ 3 分力計の感度を増大させねばならない。ところが、余り感度が良いとセンサ軸が水平に近いとき自重の影響を受けるので限界はあるだろう。

6. ロボットを用いた曲面微制御

6.1 微制御の方法

ロボットを用いた曲面微制御の方法を述べる。センサの運動の自由度は、センサ軸周りの回転は必要ないとして 5 自由度である。磁力センサから得られる情報はセンサ軸の傾きの 2 自由度と軸方向の変位 1 自由度の合計 3 自由度であるから、残り 2 自由度を拘束すればセンサの動きは制御できる。そこで、図 10 のように絶対空間におけるセンサ先端の軌跡の XY 平面への投影曲線 $Y=f(X)$ を外から規定することにする。そして、センサ先端の Z 座標とセンサ軸の XY 平面に対する傾き (θ, ϕ) をセンサの出力から求める。

図 11 に曲面微制御のための流れ図を示す。最初にメインプログラムから説明する。測定面上のスタート地点からの最初の 3 点については Z 座標及び法線方向とも見当がつかないので、とりあえずセンサ軸を鉛直下方へ向けて比較的高い位置から接近する。そしてセンサに出力が開始したらサブルーチン“CORRECTION”へ跳び、センサ軸の傾きと測定面との間隔を修正して曲面の形状データをメモリーに記憶す

る。4 点目からは外挿法によってセンサの姿勢と位置を予想し一定のサンプリング間隔離れた次の点へ移動する。

サブルーチン“CORRECTION”では最初にセンサ軸の傾きが修正される。センサ座標系で法線方向 α, β は式 (1), (2) により求まるので、センサ先端を中心にセンサ軸を傾け法線に向かせる。この段階で F_x, F_y はともに零になり、 F_z は磁気力ベクトル $\vec{F}$ の大きさに一致するはずである。そこで F_z が設定値 F_0 と誤差 $\pm \epsilon_1$ の範囲で一致するまで測定面との距離を調節する。そして次のステップで $(F_x^2 + F_y^2)^{1/2}$ が許容値 ϵ_2 より小さいか否かを調べ、それによりセンサ軸が法線から $\tan^{-1}(\epsilon_2/F_0)$ の偏角内であるか否かを確認する。偏角内なら 5 つの関節角と、同時に求まる形状データ Z, θ, ϕ をメモリーにストアする。そうでなければサブルーチンの最初に戻って角度の修正からやり直す。

6.2 ロボットによる曲面の形状測定

図 12 は 5 軸の垂直多関節型ロボット (MOVE MASTER II) が磁力センサを用いて曲面の形状測定を行っているところである。測定面は波長 180 mm、振幅 7 mm の正弦波を断面に持つ 2 次曲面で、プレハードン鋼を $\phi 16$ mm のボールエンドミルを用いてピクフィード 2 mm で加工した。

図 13 には測定面に沿って約 5 mm ピッチで測定した法線を線分で、試料面上の座標値を黒点で示してある。測定物に対して同じ倍率で示してあるので、測定誤差がかなり大きいことが分かるが、これらは実際のセンサの姿勢や位置を表したものではない。測定面との間隔 L は 2 mm を基準に ± 0.1 mm、傾きは法線から 2° 以内に収まるように許容値 ϵ_1, ϵ_2 を設定したので、既に述べたセンサの精度から考えて、この程度の曲面ならば設定どおりの精度で実際には位置決めされている。ところが、これらは 5 つの関節の回転角から計算で求めているので、求めた法線の方法は図のように現物とのズレが 3.8° 、Z 座標の誤差は ± 2 mm もある。これはロボットの関節のガタやバックラッシュが原因であり、磁力センサの測定精度以上の位置決め性能を持つ機械を使用すれば正確に位置決めされていることが確認できるであろう。とにかく、磁力センサを用いればガタの大きな機械の位置決めも精度良く行えることが分かる。

7. 結 論

新しく提案した磁力センサは永久磁石が強磁性体の表面の法線方向に吸引される現象を利用し、測定面の法線と変位を非接触で検出できるセンサである。本研

(a) Main program

(b) Sub program "CORRECTION"

Fig. 11 Flow chart for the contouring control method using the magnetic force sensor

Fig. 12 Measurement of contour using a robot installed with the magnetic force sensor

Fig. 13 Measured direction of the normal and displacement of the specimen surface

ボットに取り付け曲面の微い制御を行った。その結果以下のようなことが明らかとなった。

- (1) 試作した8mm径のセンサでは板厚0.8mm以上の鋼板ならば鋼種によらない一定の出力が得られる。

究ではまずセンサの基本特性を調べ、次にセンサをロ

- (2) 法線の測定誤差は測定面の曲率が大きく変化する箇所でも最大となる。
- (3) 変位の測定誤差は測定面の曲率が大きい箇所でも最大となる。
- (4) 磁石径が小さいほどセンサの測定精度は向上する。
- (5) 位置決め精度の良くないロボットでも磁力センサの出力を頼りに曲面に就って正確に動くことができる。

磁力センサの運動の自由度のうち、2自由度の拘束の仕方によってはほかにも様々な応用が考えられる。例えば必ずしも面に垂直ではなくある角度を保って動くとか、任意の位置と方向にあげられた穴の中心軸を非接触で見つけることなども可能である。

謝 辞

研究の遂行に当たっては葛飾区立高砂中学校教諭池田敦彦氏、元芝浦工業大学学生（現オリンパス光学（株））寺西禎氏のご協力を得ました。紙面を借りて厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) H. Hanafusa, T. Yoshikawa, Y. Nakagawa & M. Takeda: Contouring Control of an Articulated Robot Arm with Manipulation Variable Feedback, Proc. 11th ISIR, Tokyo, (1981) 429.
- 2) S. Ando & N. Miyake: Development of a New Robot Profile Following Method, Proc. 11th ISIR, Tokyo, (1981) 447.
- 3) 増田良介, 佐々修一, 長谷川健介: 位相情報に注目した光学式近接センサ, 計測自動制御学会論文集, 17, 9 (1981) 945.
- 4) 後藤和宏, 下河辺 明, 長田秀治: 光学式非接触プローブについて, 昭和58年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1983) 839.
- 5) 多田達美, 中村 久, 菊池隆也, 岸浪建史, 斎藤勝政, 亀井利明: 面法線検出型形状測定センサによる3次元曲面の形状測定, 昭和58年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1983) 701.
- 6) 幸田盛堂, 牛尾純裕, 小谷輝男, 福永勝美: アナログ式多次元検出器の開発 (第1報), 昭和56年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1981) 616.
- 7) 例えば, W. K. H. Panofsky: Classical Electricity and Magnetism, Addison-Wesley Publ. Co., Mass., (1962).
- 8) 谷 泰弘, 畑村洋太郎, 長尾高明: 切削用小形3方向ロードセルの開発, 日本機械学会論文集 (C編), 48, 432 (1982) 1265.

——精密工学会刊行図書のご案内

「精密工学シリーズ」

精密工学会編・（株）オーム社発行

工学における精密工学の役割がますます重要になり、すべての工学分野の基礎として位置付けられる時代をむかえつつあります。本シリーズは、学会として精密工学分野を新しい視点で体系化し、かつ幅広く理解されることが必要と考え、精密工学・工業に携わる人々に有効な知識をわかりやすく提供しようとするものです。

「精密機構」(大輪武司ほか著) A5判・216ページ・発行62年4月・定価3000円

目次 1章・序論／2章・精密位置決め機構／3章・情報機器の精密機構／4章・光学機器の精密機構／5章・精密回転機構／6章・精密機構のための超精密測定法

「研削工学」(竹中規雄ほか著) A5判・206ページ・発行62年5月・定価3200円

目次 1章・研削工学の概説／2章・研削力学／3章・研削表面工学／4章・研削砥石工学／5章・研削動力学／6章・研削技術／7章・研磨加工

「自動組立の基礎」(牧野 洋ほか) A5判・180ページ・発行62年6月・定価2700円

目次 1章・自動組立システム／2章・製品設計と工程設計／3章・移送／4章・部品自動供給装置／5章・部品の整列・選別の技法／6章・装入／7章・結合／8章・計測／9章・組立機械の制御／10章・自動車用メータゲージの組立／11章・腕時計の自動組立

お申込みは書店にしてください。

なお、会員の方で、一括して10部以上購入される場合は、定価を1割引きに致します。その場合は本会へお申込み下さい。発送、代金の請求はオーム社より行います。

また、大会、講習会開催時等に、期間限定割引販売を予定しています。