遠隔操作型配電作業ロボットの距離センサシステム

脇 迫 仁^{*1} 白 石 一 成^{*1} 村 井 真 二^{*1}
 橋 口 幸 男^{*1} 石 川 伸 一^{*1} 鶴 田 健 吾^{*1}
 丸 山 佳 長^{*2} 矢 野 京 二^{*2} 中 島 盛 之^{*2}

Range Sensor System of a Teleoperation Type Hot Line Maintenance Robot

Hitoshi Wakizako^{*1}, Kazunari Shiraishi^{*1}, Shinji Murai^{*1},
 Yukio Hashiguchi^{*1}, Shin-ichi Ishikawa^{*1}, Kengo Tsuruta^{*1},
 Yoshinaga Maruyama^{*2}, Kyouji Yano^{*2} and Moriyuki Nakashima^{*2}

We have been developing a teleoperation type robotic system for hot line maintenance. In the system, a dual-arm robot is operated by manual control and automatic control. The range information of objects is very useful for the automatic operation. We have developed a range sensor system in which a range sensor measures the distances to an object and the robot manipulates the object based on the range data. This paper describes the range sensor system. The range sensor consists of a spot laser source and two CCD cameras, and computes ranges using triangulation method. In order to reduce the influence of sunlight, the laser emission synchronizes with the frame signal of the camera. A differential images are obtained by subtraction of two sequential raw images and a minimum image is computed from the differential images. The laser spot on an object is detected in the minimum image. Calibration is essential for a sensor-based robot. This paper also mentions the calibration method, and lastly the application examples for robot manipulation and robot base approach are presented.

Key Words: Range Sensor, Calibration, Sensor Based Robot, Teleoperation

1. は じ め に

架空配電線工事における作業環境の改善と安全性向上のために、我々は1989(平成元)年から配電作業のロボット化に取り組んできた。その間、オペレータがバケットに乗って操作する搭乗操作型ロボットを開発し、現在は地上から監視モニタを見ながらロボットを操作する遠隔操作型ロボットの開発、実用化を目指している。

遠隔操作でロボットを円滑に操作するには対象物までの距離感が必要となる。向田らは、立体視のできる監視モニタを使って配電作業を行うシステムを開発している[1][2]。立体視モニタは、ある程度の遠近感はあるが細かい作業への対応は難しいと考えられる。また、長時間の作業ではオペレータの疲労の問題も無視できなくなる[3]。一方、我々のシステムではオペレータによる遠隔操作とティーチング・プレイバックによ

る自動運転の組み合わせで双腕ロボットによる配電作業を行っており、自動運転の比率向上が本研究の目的である。

プレイバックによる自動運転が可能となるには、作業時にロボットを搭載したロボットベース(Fig. 1 参照)と作業箇所の相対位置がティーチング時と同じであることが望ましい。また、電線や碍子などの対象物の位置や姿勢が分かると、その値からティーチングの位置情報をシフトすることによって自動運転がさらに実行しやすくなる。このためには、作業箇所や対象物の位置情報が必要となる。本システムではこれらの位置情報を得るために距離センサを搭載しており、作業箇所や対象物までの距離を測定し、その情報に基づいてロボットベースを動かしたり、ロボットによる自動作業を行っている。本論文では、この距離センサシステムについて述べる。

従来、産業用ロボットでも対象物の位置をビジョンセンサで求めて対象物を把持する作業が行われている。これらの手法と本システムとの違いは以下の点にある。

1) 産業用のビジョンセンサは屋内の整った環境で用いられるが、本センサは屋外の非整備環境で用いられる。整備環境下では画像処理により対象物の検出が可能であるが、屋外では背

原稿受付 1996年4月12日

^{*1}(株)安川電機

^{*2}九州電力(株)

^{*1}Yaskawa Electric Corporation

^{*2}Kyushu Electric Power Co., Inc.

Fig. 1 Hot line maintenance robotic system

景や明るさが様々に変化するため対象物の検出が難しくなる。そこで、本システムではオペレータが監視モニタ上で対象物を指示し、そこまでの距離をセンサで測定する構成とし、距離測定の処理において屋外環境を考慮している。

2) 産業用では測定範囲が1[m]くらいで十分であるが、本センサではロボットベースのアプローチに用い、5[m]まで必要となる。距離測定は三角測量の原理を用いており、5[m]までの測定範囲を満足しロボットの作業に必要な精度を得るために受光カメラを2台設けている。

3) 一般に産業用では対象物のずれが2次元平面上に限定され、センサ、ロボットともに固定されているため、センサ座標からロボット座標への変換が容易である。一方、本システムでは対象物が3次元空間中でずれ、距離センサはパン・チルト機能のついた架台に置かれ、ロボットは前後に移動するスライドに搭載されているため、センサ座標からロボット座標への変換では精度が重要となってくる。そのため、本システムではロボットだけでなく、左右のロボット同士、スライド、センサ架台のキャリブレーションを行っている。

本論文の構成は、2章で全体システムの概要を説明し、3章、4章で距離センサとキャリブレーション方法について述べ、5章で作業例について述べる。

2. 全体システムの概要

Fig. 1に本ロボットシステムの外観図を示す。システムは大きくは車両上に設置したキャビンとロボットを搭載したロボットベース、それを支えるブームからなる。キャビンはオペレータがロボットを操作するための操作盤や監視モニタが備えられている。一方、ロボットベース上には、配電作業を行う双腕ロボット、重量物を吊り上げる第3アーム、工具と材料を交換する自動工具交換装置と自動材料授受装置、作業を監視する複数のカメラ、そして距離センサが搭載されている。

ロボットにはティーチング・プレイバックによる自動運転とオペレータの操作による手動運転の機能があり、人間の判断が必要な細かい作業以外はほとんど自動運転である。距離センサを使った作業では、指示された作業点までの距離を測定したのち、その距離情報をもとにロボットが自動で作業を行ってい

Fig. 2 CCD device and laser source

る。またブームも手動運転と自動運転の機能があり、作業開始点への自動移動では距離センサの距離情報を用いている。

3. 距離センサ

3.1 概要

物体までの距離を測定する手法には、光の伝搬時間から求める手法と三角測量の原理を用いた手法がある[4]。一般に前者は数十[m]から数百[m]の測定範囲が得られるが、精度が1[cm]以上ありロボットの作業には不十分である。一方後者は、広い測定範囲はないが数[mm]程度の精度が得られるため、産業用ロボットのセンサでは広く用いられている。

三角測量を用いる場合、複数のカメラの各画面上での対応点から距離を求めるパッシブな手法とレーザ光などの光を照射し照射点の位置をカメラ画像から検出して距離を求めるアクティブな手法がある。本システムでは両方の距離測定機能を備えている。パッシブ法では、二つの監視カメラの画面上で対象物が画面中央に位置するように各カメラの向きを調整し、その角度から対象物の位置を求めている。アクティブ法では、レーザスポット光と受光カメラを用いオペレータがレーザ光を対象物にあて、受光カメラにより照射点の位置を求めて距離を測定している。実際の作業では後者のほうが頻繁に用いられ、ここではレーザ光によるアクティブな距離測定法について述べる。

3.2 光学系の構成

レーザ光源と受光カメラの配置は、距離センサに要求される測定範囲と精度から決定される。本センサはロボットの作業と作業域へのロボットベースのアプローチに用いる。ロボットの作業範囲は、距離センサから約1[m]~2[m]の領域で、要求される精度は±5[mm]以下である。一方ロボットベースのアプローチでは測定範囲が5[m]まで、そのときの精度が±50[mm]以下である。

測定範囲と精度は、主にレーザ光源と受光カメラの相対的な配置、受光カメラのレンズの焦点距離、受光カメラの受光素子の画素数で決定される。ただし精度の場合、画像処理によるレーザ照射点の位置検出精度も考慮しなければならないが、ここでは受光素子の1画素あたりの精度で検討する。

Fig. 2に示すように受光カメラのレンズの焦点距離を F 、レーザ光源と受光カメラのレンズ中心までの距離を D 、レーザ光源から出たレーザ光が受光カメラの光軸と交わる点までの距離を L とする。レーザ光源から距離 l にある点が受光素子上に投影された点の位置を x とする。 x は受光素子の水平方向の座標で素子の中心を原点とする。このとき l と x との関

Fig. 3 Optical configuration of the range sensor

Table 1 Computed one-pixel resolution r for distance D

D [m]	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
r [±mm]	1.4	1.1	2.0	3.1	4.5	23.1	35.8

係は、

$$l = \frac{D(FL - Dx)}{DF + Lx} \quad (1)$$

となる。 x の範囲は受光素子の幅であり、これより l の範囲、即ち測定範囲が決まる。また1画素あたりの精度は、 x が1画素幅だけ変化したときの l の変化量から求め、距離 l が大きくなるほど精度は悪くなる。

そこで上述した測定範囲と精度を満足するように D, F, L を求めたが、一台の受光カメラでは実現できないため本センサでは二台の受光カメラを用いた。 Fig. 3 にその構成を示す。測定範囲の異なる近距離用と遠距離用の受光カメラがあり、日光の影響を考慮しそれぞれのカメラにはレーザ光の波長のみ通すフィルタを取り付け、屋外での明るさの変動に対応するため自動絞り機能付のレンズを用いている。またレーザスポット光は、照射点がオペレータに分かりやすいようにハーフミラーを使って監視カメラの光軸とレーザ照射方向を一致させている。

これらの構成で測定範囲が0.7[m]から5[m]まで得られる。また近距離用、遠距離用カメラの1画素あたりの分解能の優れているほうの計算値を Table 1 に示す。距離2[m]で±2[mm]、5[m]で±35.8[mm]となり上述した条件を満足している。

3.3 照射点検出処理

屋外では太陽光や背景の影響により受光カメラの画像からレーザ照射点を検出することが非常に難しい。そのため、画像のフレーム信号に同期してレーザ光を点滅させ照射時と停止時の画像の差をとった画像（以下、差画像と呼ぶ）がよく用いられ[5][6]、本方式でもこの差画像を用いた。ただし、差画像は画像間の時間的な変化点を抽出するため、背景に移動体があるときはこれらの動きも検出してしまう。そこで本センサでは以下のような処理を行っている。

Fig. 4 に検出処理の流れを示す。レーザの照射時と停止時の画像から差画像を求める。さらに連続したいくつかの差画像から最小値画像を求める。最小値画像の各画素の値は、それぞれの差画像中の対応する画素の値の最小値である。これは差画像中ではレーザの照射点は静止しているが背景の移動体の領域は動くことに着目し、変化しない領域だけを抽出する処理となっている。これによってレーザの照射点のみが抽出される。ただし、この手法は最小値画像を得るときの差画像の数が多ほど

Fig. 4 Laser spot detection process

(a) Raw image

(b) Differential image

(c) Minimum image

Fig. 5 Example of laser spot detection

背景の変化による外乱は除くことができるが、対象物自身が揺れるときは検出が難しくなるため実作業での評価から2, 3枚の差画像から最小値画像を求めている。 Fig. 5 に本手法による検出例を示す。(a)が原画像で電線にレーザをあてその背後で手を振っているシーンである。(b)はその差画像であり、レー

Fig. 6 Accuracy of the range sensor

だけでなく手の動きも検出されている。(c)は差画像から求めた最小値画像でレーザの照射点のみが抽出されている。

最小値画像から照射点の位置を求めるのは従来の画像処理の手法を用いている。このとき、レーザ光源と受光カメラの相対位置は固定されており、対象物の位置が変化するとき画面中の照射点はエピポーラ線方向に移動するため、照射点探索をこの範囲に限定することでも外乱の影響を押さえている。

求まった画面中の照射点の位置から実際の距離の計算は、予め作成した照射点位置と距離との関係のテーブルから補間を行っている。Fig. 6に本距離センサの精度試験の結果を示す。センサを固定して平板をセンサに対して動かしたときの板までの実際の距離と測定結果との差を示している。Table 1に示した1画素あたりの分解能より誤差が小さくなっている。これは、照射点の検出精度が1画素以下のことを示している。

4. キャリブレーション

4.1 概要

距離センサによって測定された地点にロボットが正確に到達するには、ロボットの絶対精度やセンサ、ロボット間の位置精度が重要となる。これらの精度は部品の加工精度や組立時の取り付け精度によって決まる。即ち、位置計算に必要な機械的定数の設計値からのずれが計算誤差となる。これらのずれ量を推定する手法がキャリブレーションである[7]。本システムではロボット単体、ロボット同士、スライド、センサ架台に関するキャリブレーションを行っている。ここでは、ロボット単体とセンサ架台のキャリブレーションについて述べる。

4.2 ロボット単体のキャリブレーション

本システムのロボットは、Fig. 7に示すように7つの自由度をもつ。絶対精度に影響する大きな要因は、各可動部の計算上の原点位置と実際の設定位置とのずれである。各可動部の移動量はそれを駆動するモータの回転量で表すことができ、このずれ量も回転量のオフセットとして表せる。そこで、 j 番目のモータの回転角度を θ_j 、オフセットを α_j とすると、ロボットの先端座標 r はこれらの関数 f として次式のように表せる。

$$r = f(\theta_1 + \alpha_1, \dots, \theta_7 + \alpha_7) \quad (2)$$

一般にキャリブレーションでは、ロボットの先端位置を何カ所か変えていき、各点で3次元測定器を用いて絶対座標を測定し式(2)の値との偏差が小さくなるように α_i などの機械的定数を求めている[8]。この手法は3次元測定器を必要とし現場で

Fig. 7 Configuration of the robot arm

Fig. 8 Calibration of the robot arm

の作業が難しいため、本システムでは以下の方式としている。

Fig. 8に示すようにロボットの手首に先のとがったペン状のツールを取りつけ、一つの固定点にツール先端を持ってくる。同様の操作をロボットの姿勢を変えて行う。各姿勢でのモータの回転量を式(2)に代入すると、その値は等しくなければならないがオフセット α_i の誤差によって異なる値となる。本キャリブレーションでは、これらの値の平均値と各値との偏差の2乗和を評価関数としてこれを最小にするオフセット α_i を最小化法[9]を使って求めている。

実際のキャリブレーションでは、5つの異なる固定点に対してそれぞれ5通りの姿勢をとり評価関数を計算している。キャリブレーション前後で評価関数のもとになる偏差の平均値は、3.8[mm]から0.7[mm]へと小さくなった。

4.3 センサ架台のキャリブレーション

距離センサの測定値は、レーザの照射方向にそった対象物までの距離である。この値は、ロボットの作業に用いるためにロボット座標へと変換される。変換に必要な値にはロボット座標からみたセンサ架台の位置と姿勢、パン・チルト駆動用モータの回転量とオフセット、レーザの照射方向とその照射位置がある。モータの回転量以外はすべて機械的な定数であり、本キャリブレーションではこれら定数の設計値からのずれ量を以下の手法で推定している。

Fig. 9に示すようにキャリブレーション用のツールを取りつけ、ツール先端にレーザ光が当たるようにパン・チルトの角度を調整する。このとき、計算上のレーザ光の軌跡は点線で示すように実際のレーザ光とは一致しない。そこで式(2)で得られるツール先端位置 r (このときすでにオフセット α_i は補正され

Fig. 9 Calibration of the sensor actuator

ている)から計算上のレーザー光までの最短距離 e を求める。この操作をツール先端の位置を変えて繰り返し、それぞれの偏差 e の2乗和が最小となる上記定数のずれ量を求めた。

実際のキャリブレーションでは、25点についてツール先端の位置を変えて行った。キャリブレーション前後で偏差 e の平均値が41.5[mm]から2.0[mm]へと改善された。

5. 作業例

5.1 ロボットの作業

キャリブレーションによって全体の精度向上が実現できるがさらに確実なものにするため、ロボットの作業ではロボットの位置情報と距離情報から相対シフト機能を用いている。Fig. 10に電線把持作業の例を示す。点線がティーチング時、実線がプレイバック時である。ティーチング時の把持点 a について距離センサによって距離を求めロボット座標に変換した座標を (Sx, Sy, Sz) 、ロボットによってその点を把持したときの式(2)による先端位置の座標を (Rx, Ry, Rz) とする。本来、ふたつの座標値は一致しなければならないが、実際には数[mm]程度の誤差がある。そこでプレイバック時には、把持点 A までの距離を測定し、これより得られた座標 (Sx', Sy', Sz') からロボットの目標位置を次の値に設定している。

$$(Rx + Sx' - Sx, Ry + Sy' - Sy, Rz + Sz' - Sz)$$

これは、ティーチング時とプレイバック時の距離センサの測定値の変化量をロボットの修正量として加えており、絶対的な精度誤差の影響を相対的な偏差をとることで小さくしている。

次に Fig. 11, 12 にスリーブ挿入作業の例を示す。これは切断し被覆をはいだ電線に円筒形のスリーブを挿入する作業である。Fig. 11 は最初のスリーブ挿入作業であり、点線がティーチング時、実線がプレイバック時である。ティーチング時のロボットの教示点が c 、電線上の距離測定点が点 a, b である。プレイバック時は、電線上の2点 A, B の位置を測定して、ティーチング時の点 a, b, c の相対的な位置関係からロボットの目標位置 C と姿勢を計算している。Fig. 12 は、もう片方の電線への挿入作業でプレイバック時の作業例である。まずそれぞれの電線端から離れた点 A, B を計測し、それを結ぶ直線を求める。その直線上に左右のロボットの先端位置を点 A, B が回転の中心となる軌跡で移動させ、スリーブと電線端が一直線に並ぶようにする。これによってスリーブ挿入作業が容易になる。

5.2 ロボットベースのアプローチ

作業開始時にはブームを使ってロボットベースを作業域まで

Fig. 10 Wire grasping

Fig. 11 Sleeve insertion (1)

Fig. 12 Sleeve insertion (2)

Fig. 13 Robot-base approach

移動させる。このときロボットベースと作業点の距離は、ロボットの動作範囲の関係から1.5[m]付近が望ましい。これを手動操作で行うと時間がかかるため、距離センサによる自動アプローチを行っている。Fig. 13にその例を示す。点 Q がロボットベースの最初の位置である。まず距離センサによって電線上の作業点 A と他の点 B の位置を求め、点 A, B を結ぶ直線の方角を電線の向きとする。これらの値をもとにロボットベースが作業点 A から1.5[m]離れた点 P に電線と平行になるようにブームを移動させる。実験では電線から約3.5[m]離れた地点からアプローチを行い位置決め誤差が ± 100 [mm]以下であった。

6. おわりに

本論文では、遠隔操作型配電作業ロボットの距離センサとキャリブレーション方法、そして実際の作業例について述べた。

距離センサはレーザ光源と2台の受光カメラからなり、三角測量により距離を測定しており、レーザ照射点の検出処理で屋外環境での影響を考慮している。またキャリブレーションは、現場での作業を前提に3次元測定器などの機器を必要としない方式となっている。実際の作業では、ティーチング時とプレイバック時の距離測定値の変移量をロボットの修正量として用い、座標変換の誤差の影響を抑えている。

今後の課題は、距離センサではロバスト性の向上である。例えば、受光カメラでは屋外環境で用いるため自動絞り機能付のレンズを使用しているが、背景が青空だけのときは絞りが小さくなりレーザ照射点が見えなくなる不都合が生じる。絞りの固定と自動調整の切替機構が必要となる。キャリブレーションでは、操作に時間がかかるため時間短縮を図りたい。また、ロボットによる作業では、レーザスポット光を当てる電線上の位置、中心か端かによって数[mm]程度の違いが生じ、これが作業に影響する場合がありこれらの改善を図りたい。一般にセンサベースドロボットではセンサに重点が置かれやすいが、我々の経験ではロボットを含めた全体システムとして検討していく

ほうが良い結果が得られやすい。今後も総合的な観点からシステムの開発を進めていきたい。

参考文献

- [1] 向田, 内山, 田村: “地上操作形マニピュレータシステムの開発”, 電気評論, vol. 79, no. 3, pp. 20-24, 1994.
- [2] 望月, 須藤, 上野, 佐藤, 近藤: “配電マニピュレータ用視覚システムの開発”, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, vol. 8, no. 2, pp. 641-644, 1990.
- [3] 黒木, 嶋, 大川, 河野, 館: “遠隔操作における能動立体視の効果と生理指標を用いる評価法”, 電気論 C, vol. 115-C, no. 2, pp. 182-187, 1995.
- [4] 井口, 佐藤: 三次元画像計測. 昭晃堂, 1990.
- [5] 中村, 斉藤, 原, 鳥居: “野外作業ロボットの視覚センサの研究 (その2)”, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, vol. 13, no. 1, pp. 291-292, 1995.
- [6] 星名, 村田, 國光, 岡井, 吉川: “搬送機器における画像処理技術の開発と適用”, 三菱重工技報, vol. 31, no. 5, pp. 300-305, 1995.
- [7] 石井: “ロボットの機構モデルとキャリブレーション”, 日本ロボット学会誌, vol. 7, no. 2, pp. 89-94, 1988.
- [8] 石井, 坂根, 柿倉, 三上: “3次元モデルに基づくロボットシステムのためのマニピュレータ・キャリブレーション”, 日本ロボット学会誌, vol. 7, no. 2, pp. 74-83, 1988.
- [9] 今野, 山下: 非線形計画法. 日科技連, 1978.

脇迫 仁 (Hitoshi Wakizako)

1958年12月10日生。1983年九州大学工学部電子工学科修士課程修了。同年(株)安川電機入社。産業用ロボットの制御技術、及びセンサの研究開発に従事。現在、基礎研究所超メカトロ研究室所属。工学博士。電子情報通信学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

村井真二 (Shinji Murai)

1963年5月18日生。1989年大阪大学工学部溶接工学科修士課程修了。同年(株)安川電機入社。配電作業ロボットの制御技術の研究開発に従事。現在、基礎研究所商品化研究センター所属。

(日本ロボット学会正会員)

石川伸一 (Shin-ichi Ishikawa)

1970年1月16日生。1992年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。同年(株)安川電機入社。配電作業ロボットのセンサ技術の研究開発に従事。現在、基礎研究所商品化研究センター所属。

(日本ロボット学会正会員)

丸山佳長 (Yoshinaga Maruyama)

1943年4月29日生。1959年九州電力(株)入社。現在、配電部工法技術開発担当課長。配電作業ロボットシステムのシステム設計、作業計画など各種配電作業ロボットシステムの研究開発に従事。IEEE, 電気学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

中島盛之 (Moriyuki Nakashima)

1964年1月5日生。1987年九州大学工学部電気工学科卒業。同年九州電力(株)入社。現在、配電部工法技術開発担当。配電作業ロボットシステムの作業計画、制御などの研究・開発に従事。電気学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

白石一成 (Kazunari Shiraishi)

1962年9月8日生。1987年名古屋大学工学部電気工学科卒業。同年(株)安川電機入社。産業用ロボットのセンサの研究開発に従事。現在、基礎研究所超メカトロ研究室所属。

橋口幸男 (Yukio Hashiguchi)

1966年10月28日生。1991年九州大学理学部物理学科修士課程修了。同年(株)安川電機入社。配電作業ロボットの制御技術の研究開発に従事。現在、基礎研究所商品化研究センター所属。

(日本ロボット学会正会員)

鶴田健吾 (Kengo Tsuruta)

1971年12月25日生。1994年山口大学工学部生産機械工学科卒業。同年(株)安川電機入社。配電作業ロボットの制御技術の研究開発に従事。現在、基礎研究所商品化研究センター所属。

(日本ロボット学会正会員)

矢野京二 (Kyouji Yano)

1957年5月29日生。1978年九州電力(株)入社。現在、配電部工法技術開発担当副長。配電作業ロボットシステムのシステム設計、作業計画など各種配電作業ロボットシステムの研究開発に従事。電気学会会員。