高放射線環境下で使用可能な基線長可動型距離センサの開発[†]

岡 潔*・檜 山 昌 之**

Development of a Variable Baseline Type Distance Sensor in the High Radiation Environment[†]

Kiyoshi OKA* and Masayuki HIYAMA**

The International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) is underway as joint effort of EU, Japan and RF. Remote maintenance technology is essential to realize ITER since the reactor components are activated by 14-MeV neutrons and have to be maintained remotely. For this purpose, the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) has been conducting remote handling technology development mainly for in-vessel components. On the other hand, a critical accident at the JCO occurred in September 1999, which was the most serious nuclear accident in Japan. It took long time to gain the information on the accident and then to stop the critical reaction since human access was limited due to high radiation level. Therefore, the JAERI has developed a Radiation-proof Robot (called RaBOT) operating under high γ -radiation field up to 10^5 Gy. Under such a background, a variable baseline type distance sensor has been developed for use under the severe conditions such as γ -radiation. This sensor is composed of optical fiber, mirror, motor and so on. The aim of the sensor is to be used for the measurement of the distance between a robot and an object under the severe conditions of the maintenance for fusion plants and atomic disaster. The sensing method is also applicable to the general distance sensor. This report describes the outline of the variable baseline type distance sensor and the results of the basic performance test.

Key Words: variable baseline, distance sensor, radiation, fusion, atomic disaster

1. はじめに

国際熱核融合実験炉(ITER)¹⁾の核融合反応空間である真空容器内部は真空容器内に発生する二重水素と三重水素(D-T)の燃焼による14 MeVの中性子により放射化される。反応停止時の保守時においても高放射線環境下となり、真空容器内部を構成するブランケットおよびダイバータ機器等の保守・交換は全て遠隔操作で行なうことが要求される。このため、日本原子力研究所では、これまでに人の代わりに真空容器内機器の交換・保守を行なう各種遠隔操作機器の開発を行

なってきた²⁾。核融合炉内で動作する遠隔操作機器は耐放射線を有する機器で構成され、レゾルバもしくは光ファイバ式エンコーダなどにより各関節の回転角度を検出し、サーボモータで駆動される。また、仮想空間上で遠隔操作機器を模倣し、その動作と位置をリアルタイムに推定するシステムも提案されている³⁾。しかし、ITERでの遠隔作業対象物は大重量で各関節のバックラッシュや構成部材の弾性変形などにより内界センサを用いたエンドエフェクタ先端位置の同定は困難であり、可搬重量が4 tonで、その腕の長さが6 mにもなるブランケット保守用マニピュレータ⁴⁾では手先位置が約50 mmも下がってしまう。このような事象に対応するため、ロボット動作時の指示方法に工夫を凝らし、たわみ量をキャンセルするような手法が提案されている⁵⁾。しかしながら、遠隔操作機器を正確に動作させ、作業を安全に行なうためには、上記手法とともにエンドエフェクタ先端から真空容器内壁あるいは構造物間までの距離測定を常に行ない、遠隔操作機器の動作を補償する外界センサが必要である。

一方、平成11年9月末に発生したJCOの臨界事故⁶⁾では、付近に居た作業員は事故発生から数分以内という短時間で被爆の症状が現われており、中性子の生物学的効果比(RBE)を考慮した吸収線量は20 Gy-Eq以上であった^{7),8)}。このため、放射線の空間線量率が高く、事故現場への救助活動員のアクセスが困難となり、事故現場の状況についての情

[†] 第2回システムインテグレーション部門学術講演会で発表(2001・12)

* 日本原子力研究所 東海研究所 大強度陽子加速器施設開発センター 中性子施設開発グループ
茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

** 三菱電機(株)生産技術センター 量産化技術推進部
尼崎市塚口本町8-1-1

* Neutron Facility Group, Center for Proton Accelerator Facility, Japan Atomic Energy Research Institute
2-4 Shirane, Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki

** Integrated Production Engineering Dept., Manufacturing Engineering Center, MITSUBISHI ELECTRIC CORP.
8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki-shi
(Received July 10, 2003)

(Revised September 30, 2003)

報が不十分で、事故の収拾が大幅に遅れた。この臨界事故のように、原子力施設で事故が発生し、放射線により人がアクセスできない場合、事故を安全かつ迅速に収拾させるために、事故現場に即座に侵入し、情報収集や事故拡大防止・停止処置作業を行なうロボットの開発が必要となる。これらのロボットにも事故の状況やロボット周囲の画像取得、あるいは、ドアの幅、階段の傾斜角度、障害物までの距離等を即座に計測および算出する距離センサを搭載し、センサから得た情報を基に、事故の復旧に向けた迅速で詳細な作業計画を立てる必要がある。

ところで、人の代わりに作業を行なうロボットに搭載するカメラや距離センサにはさまざまな方法が提案されている。たとえば、1台のカメラからの映像取得だけではなく、複数台のカメラを使用するようなロボットビジョン⁹⁾やリアルタイム距離画像入力による3次元画像計測¹⁰⁾などが挙げられる。そして、さらに詳細な距離画像を生成するために液晶シャッター式空間コード化レンジファインダ¹¹⁾、スキャン符号化レンジファインダ¹²⁾なども提案されている。また、実際の作業現場での利用を目指した方法として、カメラ2台を組み合わせて、遠近両方の領域で距離計測を行なうことが可能な遠隔操作型配電作業ロボット用のセンサシステム¹³⁾もある。

ところが、これらの装置はシステムが大型または複雑である、キャリブレーションが面倒、計測処理に時間がかかるという問題点がある。また、従来の市販されている距離センサなどでも明らかなように、センサの内部にPSDおよびCCD等の半導体素子が使用されているということから、数kGy/hのγ線強度が予想される核融合炉のような極限環境下では、数分程度の使用で動作不能になることがわかっている¹⁴⁾。

このような背景を踏まえ、核融合炉内や原子力事故時等の高放射線環境下で作業するロボットに搭載可能な距離測定手法に基づく距離測定センサを開発した。本件では、距離測定原理について述べるとともに、今回開発した距離測定センサの概要と特性試験結果を報告する。

2. 距離測定方法

2.1 計測手法の比較

距離を測定する方法にはさまざまな手法があるが、核融合炉内の遠隔操作機器や原子力事故時対応ロボットに搭載するセンサ特有の条件は、(1)放射線環境下で使用可能なこと、(2)測定範囲と比較して測定精度がよいことである。さらに、(3)放射性物質にできるだけ近寄らないで遠距離からの計測が可能なること、(4)運用上の観点から1つのセンサで遠近両方すなわち測定範囲の広い計測が可能であることも望まれる。ここで、上記要求仕様を満足する方式としてレーザー光を利用したアクティブセンサに着目した。一般的に、レーザー光を使用し三角測量法の原理を基本とした距離センサでは、レーザー光を測定対象物に当て、対象物からのレーザー反射光(散乱光)を受け取る。レーザー光を受け取る側には、

半導体素子(PSD, CCD等)が使われ、レーザー光がどの画素に入射したかを判断して距離を算出する方式が多い。また、スリット光を利用し、リアルタイムな距離画像計測を目指したシリコンレンジファインダ¹⁵⁾も同様に半導体素子でレーザー光を受け取る方式である。これらの場合、センサの精度は受光部に使用される半導体素子の性能(分解能・受光特性など)に依存する。

一般的に半導体素子は放射線に弱いことから、それらの半導体素子を利用しなくても構成可能で、可能な限り単純な計測原理の距離センサが適している。そこで、三角測量法を基本に耐環境性と高い測定精度の維持とが両立可能な距離計測手法を検討した。

Fig.1に示すように、従来の三角測量方式を使用した距離センサでは、スポットレーザー光を発光素子に、CCDカメラ(またはPSD素子)を受光素子に利用する構成となる。このシステムでは、入射角 θ を受光素子であるCCDカメラに反射光が投影される位置ズレ Δx として次式のように算出可能である。

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta x}{f}\right) \quad (1)$$

ここで、 f は焦点距離であり、対象物までの距離 D が次式から得られる。

$$D = L \tan\left\{\beta + \arctan\left(\frac{\Delta x}{f}\right)\right\} \quad (2)$$

以上のことから、このCCDカメラに投影されるスポット光の位置ズレからなす角を検出する場合には、利用するCCDカメラの受光素子の分解能に大きく依存する。なお、受光素子には、製造時における品質のバラツキや、素子上の受光位

Fig.1 Principle of usual triangular measurement with CCD or PSD

置と素子出力の比例関係からのズレが大きいため、高精度な距離測定には数多くの校正データを有する必要がある。また、耐放射線性を有する CCD および CMD カメラも開発されている^{16)~18)}が、コストが高く耐放射線性も不十分であり、高い放射線環境下では高密度で高精度な半導体素子を搭載したセンサの使用は困難である。

この従来の方式に対し、移動ロボット用環境センサとして、回転式ミラーにより対象物からの反射光を受光素子のある一定の領域に集光させるようなシステムが提案されている¹⁹⁾。つまり、受光素子に光が入ったかどうかを判断しさえすればよく、受光素子の性能に依存しない計測システムを構築可能となる。Fig. 2 にこのシステムの概念を利用し、ミラーの回転運動に注目した場合の距離計測手法の概念図を示す。

ミラーの回転角度を θ とすると、対象物までの距離 D は次式により求まる。

$$D = L \tan \beta = \frac{L}{\tan(2\theta)} \quad (3)$$

$$\text{ここで、} \beta = \frac{\pi}{2} - 2\theta$$

この手法により、受光素子の性能による測定距離精度の問題点は解決され、ミラーの回転性能のみが測定距離の性能を決定する要素となる。

一方、上記に述べた回転方式の距離センサでは、受光側に入射される対象物からの反射光の向きから距離測定を行なうが、反射光の向きは一定で発光素子と受光素子間である基線長を変化させ、その基線長から距離測定を行なう方式も考えられる。Fig. 3 に基線長を可動させる距離センサ(以下、基線長可動型距離センサ)の概念図を示す。

この計測手法では、入射光が受光素子の中央に来るよう発

光側を並進運動することにより、その移動量から対象物までの距離が次式のように算出可能となる。

$$D = (L_0 + \Delta L) \tan \beta \quad (4)$$

ここで、 L_0 は基線長を可動する前の初期値であり、基準基線長である。また、 ΔL は基線長の動作量を表わしている。この計測手法を用いることにより、上記に述べた回転方式でミラーを利用するシステムと同様に受光素子の性能に依存しない計測システムが構成可能である。この手法による測定距離精度は、基線長を変化させる並進性能のみにより決定される。

2.2 キャリブレーション手法

距離センサを遠隔操作機器に搭載し、センシングシステムを構築後、測定距離精度に組立て誤差や機器のバラツキなどが与える影響をできる限り消去するためには、センサの校正(キャリブレーション)が必要となる。三角測量法の場合、基線長と2つのなす角のキャリブレーションが必要であるが、ここでは簡単のため、一方のなす角を 90 deg と仮定した場合のキャリブレーション手法を述べる。

2.2.1 ミラー回転型

Fig. 2 に示す受光素子性能に依存しないミラー回転型の場合には、最初に基線長 L となす角 β_0 の初期姿勢値における対象物までの距離 D_0 を測定する。つぎに、初期姿勢からミラー回転機器の分解能に応じた角度 $\Delta\theta$ だけ回転し、対象物までの距離 $D(D = D_0 + \Delta D)$ を測定する。ここで、初期姿勢である基線長 L 、なす角 θ_0 は次式と正接の和の公式より計算される。

$$\tan \beta_0 = \tan \left(\frac{\pi}{2} - 2\theta_0 \right) = \frac{D_0}{L} \quad (5)$$

$$\tan(\beta_0 + \Delta\beta) = \tan \left\{ \left(\frac{\pi}{2} - 2\theta_0 \right) + 2\Delta\theta \right\} = \frac{D}{L} \quad (6)$$

Fig. 2 Principle of triangular measurement type of rotation way with mirror

Fig. 3 Principle of triangular measurement type of variable baseline

これより、

$$L = \frac{\Delta D \pm \sqrt{\Delta D^2 - 4D_0(D_0 + \Delta D) \tan^2(2\Delta\theta)}}{2 \tan(2\Delta\theta)} \quad (7)$$

$$\theta_0 = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{L}{D_0}\right) \quad (8)$$

実際のキャリブレーションでは、回転角度を変化させて上記の測定を複数回実施する必要がある。上式より明らかなように、基線長 L を求める際には 2 次方程式を解く必要があり、計算誤差の影響も考慮する必要がある。また、 L の誤差が θ_0 の算出結果に影響を与えてしまうことがわかる。

2.2.2 基線長可動型

Fig. 3 に示す基線長可動型の場合には、最初に、初期位置・姿勢(基準基線長 L_0 、なす角 β)において、対象物からのレーザー投影スポットが受光素子の中央に来るようにレーザースポットの発光軸上に対象物を設置する。つぎに、この配置における対象物までの初期測定距離 D_0 を測定する。最後に、初期位置・姿勢から発光側の並進分解能に応じた並進量 ΔL だけ発光素子を並進させ、対象物までの距離 $D(D = D_0 + \Delta D)$ を測定する。具体的な関係式を以下に示す。

$$\tan \beta = \frac{D_0}{L_0} \quad (9)$$

$$\tan \beta = \frac{D_0 + \Delta D}{L_0 + \Delta L} \quad (10)$$

以上の 2 式により、初期位置・姿勢 L_0 、 β は次式により算出可能である。

$$L_0 = \frac{\Delta L}{\Delta D} D_0 \quad (11)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{\Delta D}{\Delta L}\right) \quad (12)$$

これより、基線長可動型距離センサの場合、基準基線長 L_0 の算出には、乗算・除算をそれぞれ 1 度行なえばよい。さらに初期位置・姿勢が独立に算出可能であることから、回転式のミラーを使用した手法と比較し、容易かつ計算誤差の影響を受けにくいキャリブレーションが可能となる。

2.3 測定距離精度

前節までに、受光素子の性能に依存しない、2 通りの距離計測手法について示した。つぎに、この 2 通りの手法を使用して距離センサを構成したときの距離測定精度について述べる。

2.3.1 ミラー回転型

ミラー角度を回転させる方式の場合、ミラー角度 θ と回転角度分解能 $\Delta\theta$ だけ回転した場合の関係式は、(5)、(6) 式より表わされ、ミラーの回転偏差 $\Delta\theta$ より生じる測定距離偏差 ΔD が距離 D における測定精度となり、次式が得られる。

$$\Delta D = \frac{(L^2 + D_0^2) \tan(2\Delta\theta)}{L - D_0 \tan(2\Delta\theta)} \quad (13)$$

これを回転分解能 $\Delta\theta$ で偏微分すると、次式が成立する。

$$\frac{\partial \Delta D}{\partial \Delta\theta} = \frac{2L(L^2 + D_0^2)}{\{L \cos(2\Delta\theta) - D_0 \sin(2\Delta\theta)\}^2} \quad (14)$$

上式より、測定距離精度 ΔD は回転角度の分解能 $\Delta\theta$ に

比例しない。すなわち、分解能が 10 倍向上(たとえば、回転分解能 $\Delta\theta$ を 1.0 deg から 0.1 deg)しても、測定距離精度はおよそ 1 倍から 2.2 倍程度であり、回転分解能の向上が測定距離精度向上に貢献する割合は小さい。

2.3.2 基線長可動型

基線長可動型の場合、基準基線長 L_0 、ならびにそこから並進分解能 ΔL だけ発光素子が並進した場合の関係式は(11)、(12)式で表わされ、発光素子の並進分解能 ΔL に生じる測定距離偏差 ΔD は距離 D における測定距離精度となる。ゆえに、 $\tan \beta$ を消去し ΔD について解くと次式が導かれる。

$$\Delta D = \frac{D_0}{L_0} \Delta L \quad (15)$$

これより、上式を L_0 で偏微分すると、次式で表現される。

$$\frac{\partial \Delta D}{\partial L_0} = -\frac{D_0}{L_0^2} \Delta L \quad (16)$$

ここで、 $D_0 > 0$ 、 $L_0 > 0$ 、 $\Delta L > 0$ であるので、上式右辺は常に負となる。これより、基線長可動型の場合には、測定距離範囲のいかに関わらず、基線長の増加により測定距離に比例して測定距離精度が向上することがわかる。つまり、測定距離精度の向上に対して、どの測定距離範囲においても基準基線長の増加による効果が期待できることを示している。

また、(15)式より、 ΔD を ΔL で偏微分すると、

$$\frac{\partial \Delta D}{\partial \Delta L} = \frac{D_0}{L_0} \quad (17)$$

となる。ここで、上式右辺は常に正であるので、並進分解能 ΔL が小さくなるほど、測定距離精度 ΔD は向上する。また、基準基線長ならびに測定範囲が同じであれば、測定距離精度 ΔD は並進分解能 ΔL に比例することがわかる。これより、目標測定距離精度に対する機器の設計が容易であるといえる。

3. 距離センサ

3.1 センサの設計

前章までの距離測定手法を検討した結果、本件で提案した新しい距離測定手法である基線長可動型を設計・製作することにした。この方式であれば、基本的には基線長部分の変動にのみに依存して対象物までの距離を測定可能である。また、センサの測定精度は受光部性能に依存しないため、従来、受光部に使用していた CCD や PSD 等の半導体素子の代わりに、放射線に比較的強い CCD や PSD ほど高画素にできない光ファイバを介した光学系で、距離センサを構成可能である。

設計したセンサの概略を Fig. 4 に示す。本センサは、放射線環境下に設置するセンサヘッド、通常環境下に設置する制御装置、センサヘッドと制御装置間を接続する光ファイバおよび電気ケーブルで構成される。センサヘッドは、レーザー投光用光ファイバ、レーザー光反射用ミラー、ミラー移動用直動機構、直動機構駆動用モータ、対象物からのレー

Fig. 4 Schematic drawing of the range finder

ザー反射光受光用レンズおよび反射光伝送用光ファイバから構成される。制御装置は、ファイバから伝送されたレーザー光を受光する CCD カメラ、受光したレーザー光を 2 値化する画像処理装置、直動機構を駆動するモータ制御用アンプ等から構成される。距離を計測する際、制御装置から光ファイバを通して投光されたレーザー光は、直動機構を用いた台座上に設置してあるミラーによって反射され、測定対象物に投光される。測定対象物上に投影されたレーザー光の映像は、受光側の集光レンズによって光ファイバに入射し、センサヘッド後段(通常環境下)に設置した制御装置内の画像処理装置の画面上でスポット像をほぼ真円に近い形状で結像する。

画像処理装置は、この像の 2 値化を行ない、重心位置座標を計算し、画面中心からのズレ量を算出する。このズレ量からスポット像の重心を画面の中心へ移動させるためのミラーの位置補正量(=ΔL)を算出し、受光したレーザー光が常に画面の中心に集光するように、ミラーを搭載した直動機構を制御する。これによって、距離の測定が可能となる。一連の距離計測手順およびレーザー光取得時の映像例を Fig. 5 および Fig. 6 にそれぞれ示す。

本測定手法をセンサの原理として採用し、設計・製作する際、直動機構の駆動には耐放射線性の高いモータが、レーザー光の投光および受光には耐放射線性の高い光ファイバが、またレーザー光の集光および反射を行なうレンズ・ミラー等の光学系にも同様に石英系を材料とした耐放射線性の高い部品が使用でき、著しく耐環境性を高めることが期待できる。さらに、受光ファイバにて対象物の画像を取得することが可能なため、通常環境下においてモニタ上で対象物を観察しながら距離を測定可能である。

3.2 センサの製作

本設計に基づいて製作した基線長可動型距離センサを Fig. 7 に示す。レーザー光源には波長 685 nm, 出力 10 mW 以下のものを使用し、光ファイバにて導光した。本センサの

Fig. 5 Algorithm of the movement of the variable baseline

Fig. 6 Spot image in measuring

Fig. 7 The variable baseline type distance sensor

基準基線長を 225 mm, ミラー移動可能範囲(基線長可動範囲)を 50 mm にすることで, センサから対象物までの測定可能距離を 900~1,100 mm(測定範囲 200 mm)とした。ここで, 直動機構に使用したボールネジのリードを 10 mm, モータの回転分解能を 1,000 ppr とすると, ボールネジの動作分解能は $10/1,000=0.01$ mm/ppr となる。したがって, 測定距離分解能は $200/50 \times 0.01=0.04$ mm となる。ところで, ボールネジに起因するミラー移動量のズレを検討する場合, ボールネジの仕様(カタログ値: 絶対位置決め精度 ± 0.02 mm)から, ボールネジに起因する可動ミラーの位置決め精度は ± 0.02 mm となる。また, 同様に, モータに起因するミラー移動量のズレを検討する場合, モータの仕様(カタログ値: モータの停止位置決め精度 ± 1 deg)から, ボールネジの停止位置決め精度は $\pm 1/360 \times 1,000$ (モータの回転分解能) $= \pm 2.77778$ ppr となり, モータに起因するミラー移動量のズレは, 0.01 (ボールネジの動作分解能) $\times 2.77778 = \pm 0.02778$ mm となる。したがって, これらのミラー移動量のズレを合計すると $\pm 0.02 \pm 0.02778 = \pm 0.04778$ mm となり, 測定距離誤差は 200 (測定範囲) $/ 50$ (基線長可動範囲) $\times (\pm 0.04778) = \pm 0.1911$ mm となる。このように, 計算によって容易に精度が検討可能な点も基線長可動型距離センサの特徴の 1 つである。なお, 受光部に使用した光ファイバの 1 本のコア径は 8 μ m, 画素数は 6,000 である。

一方, 可動ミラーの制御は汎用パソコン(CPU: i486 DX, OS: MS-DOS, モータ駆動用ボード)で行ない, 画像処理は市販の画像処理装置(シャープ製 IV-S 10)を利用した。画像処理結果は RS-232 C 経由でパソコンへデータ入力される。

ここで, 本センサには, 石英を主な材料とし, 耐放射線性が 3 MGy の光ファイバ¹⁴⁾を使用し, 同様に集光レンズおよび反射ミラーにおいても, 石英を主材料とした耐放射線性が 200 MGy 以上のもの¹⁴⁾を使用している。また, 直動機構を駆動するモータには, 別途, ガンマ線照射試験を行なった結果, 20 MGy 程度までの耐放射線性を確認したサーボ機構搭載型ステッピングモータを採用している。これらの部品構成によって, 今回開発した距離センサの想定耐放射線性能は光ファイバに依存して 3 MGy 程度で, 一般の距離センサ(1 kGy 程度)¹⁴⁾の 3,000 倍である。仮に JCO 事故程度(γ 線へ換算した場合の空間線量率: 20 Gy/h)の放射線環境下であ

Fig. 8 Test result of the fabricated distance sensor

れば, 通常は 50 時間程度で故障するセンサが 15 万時間程度まで動作可能となる。ゆえに本センサは耐放射線性に優れているといえる。

3.3 特性試験結果

製作したセンサを使用し, 通常環境下で基礎特性試験を行なった。試験では, 10 μ m の測定精度が保証されているリニアスケール上に測定対象物を設置し, その測定対象物を製作したセンサ前方 900 mm~1,100 mm の範囲で移動させ, リニアスケールの出力値と, 製作したセンサからの出力値を比較した。各測定点における距離計測の結果とリニアスケール値との誤差の関係を Fig. 8 に示す。各測定点における分解能は 0.1~0.2 mm, 誤差は約 $-0.1 \sim 0.3$ mm 程度となった。つまり, 本センサは, 精度 0.01% 程度であり, 核融合炉内(高放射線環境下)で使用するセンサとしては, 十分, 高精度な距離計測結果である。さらに, 耐放射線性を有しない市販されているレーザー式距離センサ(キーエンス製 LF-2510)では, 2 m 先での分解能が ± 0.5 mm(16 回平均値: カタログ値)であり, これと比較しても遜色ないといえる。また, 予想測定距離誤差は ± 0.1911 mm であり, ほぼ同様な値となった。多少の数値の開きはレーザー光を画像処理装置で 2 値化する場合, センサ周辺の散乱光等の変化によって, 2 値化の領域が変動するため, その重心を算出する際に誤差が生じるものと考えられる。そのほかにも, センサ製作時におけるレンズ光軸のズレや直動機構の位置ズレ等光学・機械的な要因等が原因であると考えられる。

つぎに, センサ前方 900, 1,000, 1,100 mm の位置における各計測点近傍での距離増加量について計測した結果を Fig. 9 に示す。結果, 計測距離が遠くなるほど, 増加量のバラツキが大きくなっていることがわかる。これは, レーザースポット光を受光するレンズが固定焦点であるため, 900 mm の位置でのスポット径が一番大きな映像であり, 計測距離が遠くなるほど, 取得できるスポット径が小さくなる。したがって, 画像処理装置でスポット径の重心計算をする際に

(a) Between 900 mm and 901 mm

(b) Between 1000 mm and 1001 mm

(c) Between 1100 mm and 1101 mm

Fig. 9 Increment test results

計算精度が落ちるために、増加量のバラツキが大きくなると考えられる。ただしこれは、ズームレンズ等を使用して、できるだけスポット径を拡大した映像を取得して重心計算することで、増加量のバラツキを改善することが可能である。

一方、パソコンによるモータ駆動制御時間および画像処理

結果のパソコンへのデータ転送時間等も含めて、測定時間は1点当たり約0.9 sec程度である。ここで、市販のレーザー式距離センサ(キーエンス製 LF-2510)においても、高精度計測時(± 0.5 mm)には複数回測定し平均する必要がある、処理時間は0.64 sec(40 msec $\times$ 16回)かかる。これより、測定距離精度、および汎用機器のみの構成であること等を考慮すると本センサは処理時間に対しても遜色ないといえる。

また、今回は制御装置や画像処理装置に汎用品を利用したが、専用機器化や CCD カメラの受光素子(PD)への置換えなどにより処理時間の短縮が可能となり、複数点計測時にも十分耐える距離センサが実現できると考えられる。

4. ま と め

核融合炉内や原子力事故時等の高放射線環境下で作業するロボットに搭載可能で、ロボットと対象物間の距離を測定することが可能な距離測定手法について、新たに基線長可動型距離測定センサを考案した。本センサの適用性を検討するために、従来の距離測定方法や、レーザー光をミラーで回転させるような方式との比較・検討を行ない、以下の優位性を明らかにした。

- (1) 乗算と除算を1回ずつ行なうことにより、基準基線長を求めることが可能であり、計算誤差が少なくキャリブレーションが容易。
- (2) 基準基線長の増加により測定距離精度が常に向上。
- (3) 直動機構の分解能向上により測定距離精度が常に向上。

一方、本手法に基づく基線長可動型距離センサを設計・製作し、下記の結果を得た。

- (1) 計測範囲 900~1,100 mm において、計算上の測定距離誤差を ± 0.1911 mm とした。
- (2) 上記の計測範囲での実際の測定誤差は $-0.1 \sim 0.3$ mm、分解能 0.1~0.2 mm であり、ほぼ設計通りであった。
- (3) 放射線環境下で使用可能な機器にて本センサを構成し、従来のセンサと比較して集積線量で3,000 倍の耐放射線性があることを示した。

以上のように新しく開発した基線長可動型距離センサの有効性を確認したが、次に述べるような研究がさらに望まれる。

- (1) ズームレンズ倍率(焦点距離)と測定距離精度との関連性。
- (2) ズームレンズの光軸ズレが測定距離精度へ及ぼす影響。
- (3) 距離計測時の画像処理ならびに探索アルゴリズム最適化。
- (4) 高放射線環境下におけるセンサの特性試験。
- (5) 放射線環境下で作業する実機ロボットへの搭載。
- (6) 処理時間の短縮を実現する距離センサの開発。

5. おわりに

現在、研究開発されている一般的なロボットには、制御装置やセンサ等の電子機器が搭載されている。これらの電子機器の多くは、高精度・高機能あるいは小型・軽量化のために多くの半導体素子によって構成されている。このため、高放射線環境下での遠隔作業が要求されるロボットでは、これらの機器を搭載した場合、JCO 事故レベルの放射線環境下で、数十時間～100 時間程度しか使用することができない。本件では、これらの状況を鑑み、高機能な電子部品に頼らず、できるだけ単純な機構と放射線に強い部品によって機器を構成し、必要とされる機能を実現するような検討を行なった。これによって、放射線に強いセンサを開発するだけでなく、計測精度の向上も図ることができた。今後、このような考え方や方法をさらに発展させて、核融合炉や原子力災害時などの高放射線環境下で活躍するロボット²⁰⁾に搭載可能な機器の研究・開発を続けていく予定である。

謝辞 本センサを製作するにあたり、多大なるご協力を頂いた(株)ライトステップ・高橋悟氏に深甚の謝意を表す。

参考文献

- ITER 工学設計活動報告, 日本原子力学会誌, **44**, 16/89 (2002)
- 多田, 柴沼: 国際熱核融合実験炉(ITER)の遠隔保守, プラズマ・核融合学会誌, **73**-1, 21/28 (1997)
- K. Oka, S. Kakudate, N. Takeda, Y. Takiguchi and K. Akou: Measurement and Control System for ITER Remote Maintenance Equipment, Journal of Robotics and Mechatronics, **10**-2, 139/145 (1998)
- S. Kakudate, M. Nakahira, K. Oka and K. Taguchi: Development of Blanket Remote Maintenance System, Journal of Robotics and Mechatronics, **10**-2, 78/87 (1998)
- 吉見, 角館, 多田, 辻, 宮川, 久保: 大重量物を扱うマニピュレータのための制御システムの開発(ITER プランケット遠隔保守ビークル型マニピュレータへの適用), 日本ロボット学会誌, **19**-6, 766/774 (2001)
- 原子力安全委員会・ウラン加工工場臨界事故調査委員会: ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告 (1999)
- 明石, 石樽: 高放射線被爆作業員に対する緊急時対応とその被爆線量評価, 日本原子力学会誌, **42**-8, 720/725 (2000)
- 加藤和明: 臨界事故と放射線防護, パリティ, **15**-9, 31/39 (2000)
- 谷内田正彦: ロボットビジョン, 昭晃堂 (1990)
- 井口, 佐藤: 三次元画像計測, 昭晃堂 (1990)
- 佐藤, 井口: 液晶レンジファインダ-液晶シャッタによる高速

- 距離画像計測システム, 電子情報通信学会論文誌(D), **J71-D-7**, 1249/1257 (1988)
- 服部, 佐藤: スキャン符号化法による小型高速レンジファインダ, 電子情報通信学会論文誌(D-II), **J76-D-II-8**, 1528/1535 (1993)
 - 脇迫, 白石, 村井, 橋口, 石川, 鶴田, 丸山, 矢野, 中島: 遠操作型配電作業ロボットの距離センサシステム, 日本ロボット学会誌, **15**-3, 156/161 (1997)
 - K. Obara, S. Kakudate, K. Oka, K. Taguchi, A. Ito, K. Koizumi, K. Shibamura, T. Yagi, Y. Morita, T. Kanazawa and E. Tada: High γ -rays Irradiation Tests of Critical Components for ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) In-vessel Remote Handling System, JAERI-Tech 99-003 (1999)
 - K. Sato, A. Yokoyama and S. Inokuchi: Silicon Range Finder-A Real-time Range Finding VLSI Sensor, Proc. Custom Integrated Circuits Conference '94, 339/342 (1994)
 - (株)ニューフェス: NUF 407
 - IST Corporation: R 981
 - 三菱重工業(株): 耐放射線カメラ
 - 高増, 加藤, 大園: 移動ロボット用環境センサの開発, 日本ロボット学会誌, **5**-3, 31/34 (1987)
 - K. Oka and K. Shibamura: Development of a Radiation-proof Robot, Advanced Robotics, **16**-6, 493/496 (2002)

[著者紹介]

岡

潔 (正会員)

1968 年 1 月 2 日生。92 年秋田大学大学院鉱山学研究科修士課程修了。同年日本原子力研究所入所。核融合炉保守用遠隔操作機器の研究・開発, 原子力防災ロボットの研究・開発等を経て, 現在, 核破砕中性子源ステーション保守用遠隔操作機器に関する研究・開発に従事。日本機械学会, 日本ロボット学会, 日本原子力学会, 日本レーザー学会の会員。

檜 山 昌 之 (正会員)

1972 年 3 月 2 日生。98 年東北大学大学院工学研究科機械電子工学専攻博士課程単位取得退学。同年同大学大学院工学研究科助手。移動ロボットの研究に従事。99 年日本原子力研究所核融合工学部博士研究員。放射線環境下におけるロボットの研究に従事。2002 年三菱電機(株)生産技術センター入社, 現在に至る。日本機械学会, 日本ロボット学会, プラズマ・核融合学会の会員(工学博士)。