

反射型極低温光変位センサーの開発

福永 真士¹, 牛場 崇文¹, 宮本 昂拓¹, 長谷川 邦彦¹, 上田 綾子², 都丸 隆行², 鈴木 敏一¹, 内山 隆¹

¹ICRR, ²KEK mail: fukum@icrr.u-tokyo.ac.jp

1. 概要

約20 Kという極低温下において動作する反射型光変位センサーの開発に成功した。その線形応答範囲はターゲットとセンサーの相対距離が20 mmのときのまわりで±3 mmと広く、数百nmの変位まで感度があるセンサーとなっている。また、非接触であるため外乱を与えない。このセンサーは先行研究により、およそ4 Kでも使用できることがわかっており、人工衛星など宇宙空間での機器の動作や研究に応用されることが期待できる。

2. 反射型極低温光変位センサーの原理

反射型光変位センサーはセンサーとターゲットとの相対距離の変化を反射光の光量の変化として測定する(図1)。開発したセンサーは図2のようにPD2個とLED1個で構成されている。その中心間の距離は9 mmである。

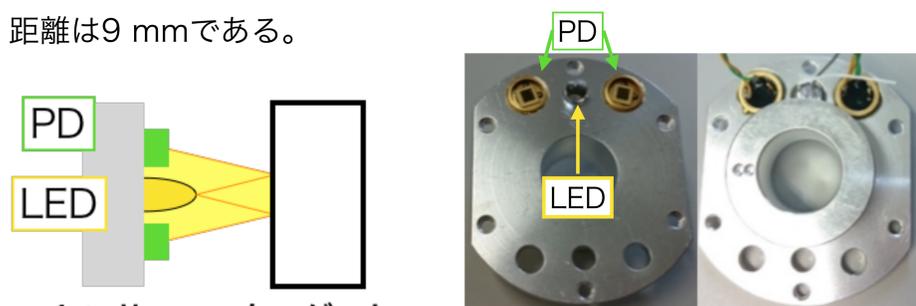


図1: 反射型光変位センサーの概念図

図2: 反射型光変位センサーの実物
LEDはthorlabsのLED1200E
PDはthorlabsのFGA21を使用。

このセンサーの応答は主にセンサーの幾何学的構造とLEDビームの形状 $F(\theta)$ によって決まる(θ はビームの広がり角)。そこで図3のようにセンサーの2次元応答モデルを考えると、相対距離 d に対するセンサーの応答出力 $P(d)$ は

$$P(d) = 2 \sum_{n=1}^n a^n \int_{\theta_1}^{\theta_2} F(\theta) d\theta$$

と表される。ここで、 a はターゲットとセンサーの壁の反射率、 n は反射回数である。

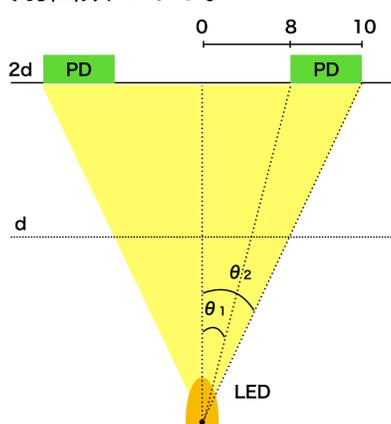


図3: 反射型光変位センサーの2次元モデル

距離 d で光が反射して $2d$ で元の位置に戻っている様子を鏡像反転させて描いた。PDの大きさが $\phi 2$ であることを露わに書いた。

このモデルを用いてセンサーの予想応答曲線を描くことができる。例えば、LEDビームが一様なビームである(uniform)と考えたときとガウシアンビームのように幅を持ったビームである(gauss)と考えたときのグラフを図4に描いた。

sensor response

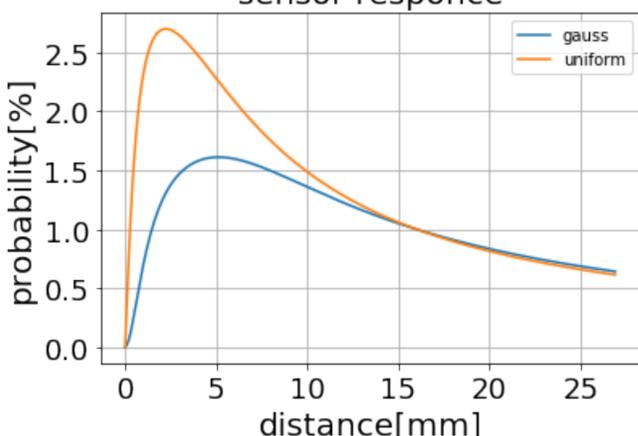


図4: 反射型フォトセンサーの期待される応答

$a=0.8, n=100$ とした。
ここでは16 mmの位置で1となるように規格化してグラフを描いている。

3. センサーの較正

このセンサーの較正には、図5のようにターゲットの位置を自由に変えられるボールネジ機構を用いた。これより、相対距離と反射光量の関係が結びつけられる。我々はまず、室温(298 K)で較正を行い、その後セットアップを崩さず極低温(15 K)で較正した。

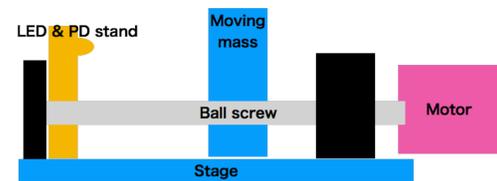


図5: センサー較正用のセットアップ
ボールネジ機構はステッパーモーターとボールネジとターゲットから成り、モーターに送ったパルス数から移動距離を換算できる。

それぞれの温度で測定したデータと線形範囲を線形フィットした結果をグラフにした(図6)。また、図7に測定結果を規格化して比較したグラフを載せた。

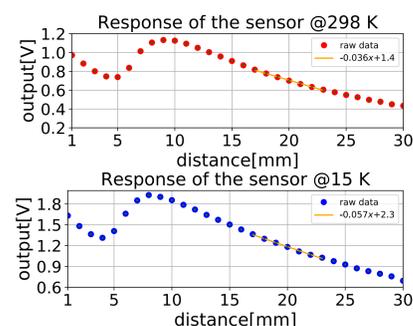


図6: 各温度における較正の結果

相対距離が20 mmの位置のとき広い線形範囲を見込める相対距離が20 mmの位置のまわりで線形フィットした。

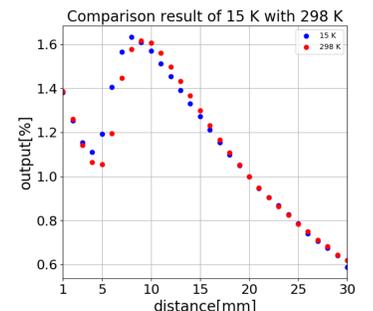


図7: 較正曲線の比較

相対距離が20 mmの位置のときのセンサーの出力値で規格化した室温・低温の結果を載せた。

この結果から20 mm以上のダイナミックレンジと相対距離が20 mmのときのまわりで線形度が5%以下の線形範囲が±3 mmあることがわかった。図7より、線形範囲の誤差をとると1%以下になることがわかり、一度室温で較正すれば極低温の較正曲線を出力値の比を掛けることで求まるという結論が得られた。

4. センサーの性能評価

モデルとの比較

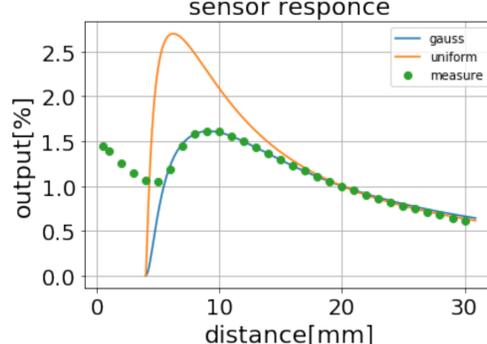


図8: センサー応答モデルと測定結果の比較
相対距離が20 mmの位置のときのセンサーの出力値で規格化してある。measureは実際の測定値。

ガウシアンビームモデルがよく一致する。

分解能

このセンサーが持つ1~100 Hzまでの低周波帯域におけるノイズの実効値への寄与は 1.0×10^{-6} mであることがわかった。

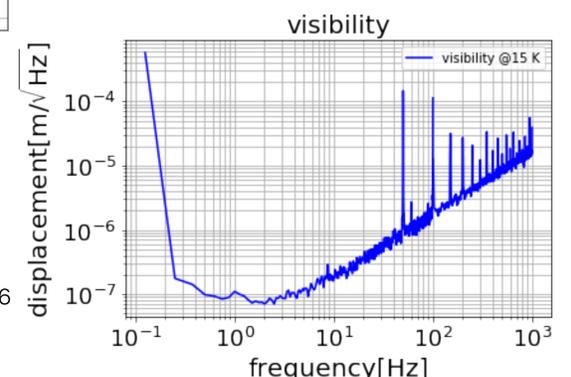


図9: センサーの分解能@15 K

長期安定性

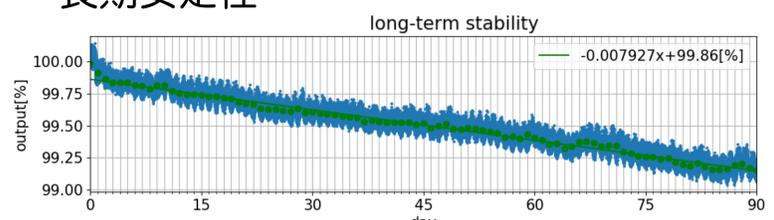


図10: 長期安定性の評価

90日間、センサーを極低温でターゲットとの相対距離を20 mmで固定して測定した。線形フィットすると最初の測定値から90日で0.75%しか出力が変化しないことがわかった。

