

## 光源の振動を利用する小型距離センサ<sup>†</sup>

王 欣雨\*・劉 忻\*・篠田 裕之\*

### A Small Range Finder Using Light Source Vibration<sup>†</sup>

Xinyu WANG\*, Shin LIU\* and Hiroyuki SHINODA\*

We propose a novel range finder composed of a point light source and a photodetector both of which are placed on a micro vibrator. The photodetector senses the reflected light intensity from the object surface and the amplitude of its fluctuation by the vibration. The distance is evaluated from the ratio of those two measured values. It is applicable to both a scattering surface and a mirror-like one, and it is stable against the dirt and the sensitivity fluctuation of the detector. Its expected applications range from medical treatment to new type of computer interface, such as a proximity sensor in minimally invasive surgery and a tongue motion sensor. The principle and experimental results using a prototype sensor are shown.

**Key Words:** position sensor, distance measurement, proximity sensor, living body surface, vibration

#### 1. はじめに

世界の人々の行動範囲がグローバル化するにつれ、一部の専門家だけでなく、一般の人が日常のコミュニケーションツールとして外国語を話す能力が求められるようになってきた。しかし成人後に外国語の発音を会得することは必ずしも簡単ではなく、特に日本人が英語<sup>1)</sup>、あるいは近年学習者が増大している中国語の会話能力を習得する場合、発音や発声方法の違いによる困難が大きいとされている。

たとえば中国語の基本音節は日本語の約3倍あり、日本語の範疇にはない音の違いを数多く聞き分け、発音する必要があるからである。この中国語発音の多様さの大部分は舌の位置や形に深く関連する<sup>2)3)</sup>から、たとえば上下の歯のわずかな隙間を通して舌までの距離を測定できるセンサ<sup>4)</sup>があり、自分で舌の位置を確認しながら発音学習が進められれば大変能率が上がると考えられる。そのようなセンサは、音声と舌位置の関係を明らかにする基礎研究や、計算機の新しいインターフェース、あるいは発音運動の混乱を抱える言語障害者の治療の補助デバイスとしても応用可能と思われる。

一方マイクロカテーテルを用いた無侵襲外科手術は現代の注目技術の一つである。しかし内視鏡を見ながらの操作は、通常の手術における視覚と手指の関係とは異なっており、特

に距離感がつかみにくいために誤操作が起りやすい。他臓器への不用意な損傷を負わせる等の医療ミスがしばしば報告され<sup>5)</sup>、ここでも内視鏡から臓器までの距離を計測する小型のセンサが望まれている。

このように生体表面に適用可能な小型の距離センサは多くの分野で潜在的に必要とされているが、よいセンサが存在しないのが現状である。そこで本研究ではそのような要求を満たすセンサを提案する。すでに我々は同様な目的で文献<sup>5)</sup>に示すようなセンサを提案している。直進性の良いレーザー光と球面波として伝播するLED光を光ファイバで導入し、それらの散乱光を観測することでファイバ先端から対象面までの距離を測定する。そのセンサは、先端部が小型で、わずかな隙間から対象面までの距離を計測可能なものであったが、濡れた表面のように鏡面反射性と散乱性を併せ持つ対象表面についてはその原理上計測誤差が不可避であった。ここでは鏡面と散乱面のいずれにも適用でき、より安定な計測が可能な新しい原理のセンサを提案する。

#### 2. 生体表面用小型距離センサ

本研究では以下のような項目を満たす非接触距離センサを開発することを目標とする。

- ① 小型(mm オーダー程度)である。
- ② センサの精度は1mm程度でよいが、数センチメートルまで測定可能。
- ③ センサ表面の汚れなどに対して測定値が左右されにくく、大きな測定の誤りを起こしにくい。
- ④ 被測定対象物の表面の傾きは未知でよい。
- ⑤ 被測定対象物の表面の色や反射特性(散乱性、鏡面性)は

<sup>†</sup> 第38回SICE学術講演で発表(1999・7)

\* 東京農工大学篠田研究室 小金井市中町2-24-16(現在: 科学技術振興事業団)

\* Sinoda Lab. Tokyo University of Agriculture & Technology  
2-24-16 Naka-cho Koganei-city  
(Received December 4, 2000)  
(Received July 17, 2001)

未知でよい。

- ⑥ 対象物の表面だけでなく、深部にまで到達した光の反射が混入してもよい。

一般に非接触距離計測法としては、光を用いた三角測量<sup>6)</sup>、波動の伝播時間や位相を測定するもの<sup>7)</sup>、対象像の焦点距離検出<sup>8)</sup>、等を主な基本原理とする手法が数多く存在する。しかし、三角測量法や焦点距離検出を基礎におく方法では、センサのサイズを測定距離に対して小さくしていくと、測定誤差が増大する(三角測量法において二つの基準点から目標点を見込む角度の測定誤差を一定とすると基準点間の距離にほぼ反比例して測定誤差が増大する。付録参照)。光パルスの伝播時間を直接測定する方法でサブミリメートルの精度を出すには、解像度ピコ秒の受光素子を作る必要があるし、光の干渉を利用する方法はセンサ自身の汚れや表面の性状によって容易にコヒーレンスが損なわれてしまうことから頑強な計測が難しい。空中超音波の利用も一つの候補になりうるが、対象面が傾いたとき反射信号が消えてしまうため、精度はおろか物体が存在することさえ見落としてしまう危険がある。また1mm径程度のビームを作るためには周波数を1MHz以上程度に設定する必要があり、その場合減衰距離が1cm程度になってしまう。このように従来の手法を用いて前述した①から⑥の制約条件を満たすセンサを実現することは容易ではない。そこで本研究では光源、受光素子の両方を振動させることによって安定に距離を検出するセンサを提案する。なお、使用する光を可視光とすれば光が表面から侵入する距離は多くの生体組織で1mmよりは十分小さいと考えられるため、項目⑥については考慮しなくてよいものとして以下議論を進める。

### 3. 基本原理

Fig. 1 に示すように点光源と受光素子が、 $x$  方向に振動可能な振動体表面に装着された構造を考える。発光、受光素子には図に示すような円筒が装着され、空間的な選択性が付与されている。いま振動体を一定振幅  $A$  で振動させ、そのとき受光される時間平均強度  $D$  と振動による強度変動の振幅  $\Delta D$  を観測量とする。このとき

$$\Delta D/D \tag{1}$$

によって対象物までの距離が計測されることを散乱体表面、および鏡面の二つの場合に分けて説明する。

#### 3.1 散乱性表面の場合

光源をインコヒーレントな点光源とし、観測面までの距離を  $x$ 、観測点手前の空間の点  $\mathbf{r}$ (光源の位置を原点  $\mathbf{r}=0$  とする) に到達する散乱光の強度を  $I_x(\mathbf{r})$  とする。光源が点とみなせ、そこから球面波が伝播するのであれば、光源から直接届く光の強度分布  $L(\mathbf{r})$  は相似則

$$L(\mathbf{r}/a) = a^2 L(\mathbf{r}) \tag{2}$$

を満たす。ここで  $a$  は任意の正数であり、各座標値での光強度  $L$  を変化させずに空間軸を  $a$  倍することと、空間軸は変化させずに強度  $L(\mathbf{r})$  を  $a^2$  倍することが等価であることを

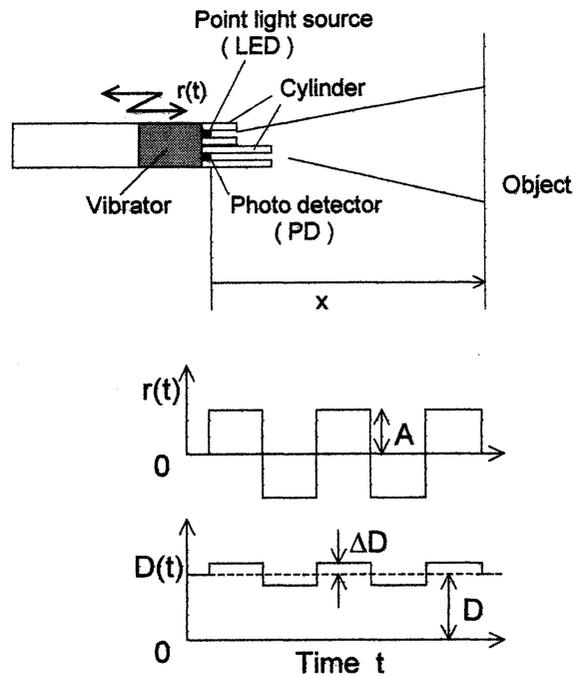


Fig. 1 Structure of the sensor and the sensing principle. The two cylinders attached to the LED and the PD localize the observation area. We estimate the distance  $x$  from the  $\Delta D$  and  $D$  of the PD output for a constant displacement  $A$  of the vibration.

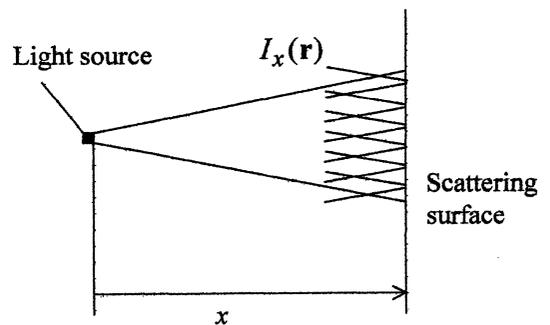


Fig. 2 Spatial intensity pattern  $I_x(\mathbf{r})$  of reflected light from a scattering surface located at  $x$

意味する。もし光が照射されている対象表面の散乱特性が空間的に一様であれば  $I_x(\mathbf{r})$  についても同様な相似則

$$I_x(\mathbf{r}) = I_1(\mathbf{r}/x) / x^2 \tag{3}$$

が成り立つと考えられる。ここで  $I_1(\mathbf{r})$  は  $x=1$  における散乱光の強度分布である。この式は、対象表面が  $x=2$  に存在する場合の光強度の空間分布が、対象表面が  $x=1$  に存在する場合の分布の空間軸を2倍にし、強度を1/4にしたものに等しい、ということの意味している。したがって  $\mathbf{r}=0$  に設置されたセンサに到達する光の強度  $D(x) = I_x(0)$  は  $\beta$  を定数として

$$D(x) = \frac{\beta}{x^2} \tag{4}$$

と書かれ、対象までの距離  $x$  の2乗に反比例する。一方振動による強度変動の振幅は、振動振幅  $A$  が小さい場合

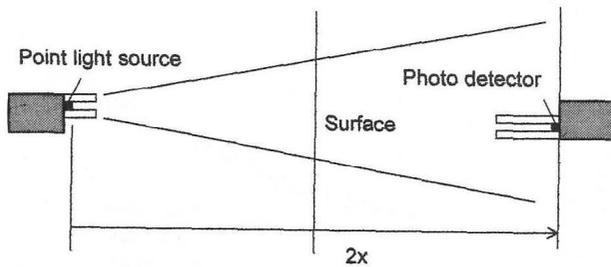


Fig. 3 Measuring a mirror-like object

$$\Delta D(x) \approx A \left| \frac{d}{dx} D(x) \right| = \frac{2A\beta}{x^3} \quad (5)$$

のように  $x$  の3乗に反比例するから、

$$x = 2AD / \Delta D \quad (6)$$

によって  $x$  が求まる。Fig.1 参照。振動振幅  $A$  が正確であれば、発光および受光部の汚れによる感度の変化や対象表面の色は距離推定値に影響しない。

### 3.2 鏡面の場合

対象がセンサに正対した鏡面である場合にも先の議論そのまま成り立つが、より見通しをよくするため鏡像法を用いて考察してみる。すなわち受光部に到達する光波は自由空間において受光部を Fig. 3 のように鏡像点に配置した場合と等価であるから、 $\alpha$  を定数として

$$D(x) = L(2x, 0, 0) = \frac{\alpha}{(2x)^2} = \frac{\gamma}{x^2} \quad (7)$$

となり、散乱性表面の場合と同じ計算

$$x = 2AD / \Delta D \quad (8)$$

によって  $x$  が求まる。

このように本測定法では表面の反射の性質によらず正しい距離を推定することができる。また、 $D$  と  $\Delta D$  は同一の素子で観測され、その比が計測量となることから、素子感度のばらつきやセンサ自身の汚れなどにも強い計測法になっている。

## 4. センサの試作と基礎実験

基礎実験として Fig. 4 に示すような装置を試作し、原理を確認する実験を行なった。コイルを巻き付けた微小シリンダーが動電駆動することによって、光源と受光素子を振動させる。この実験での駆動系は目標サイズよりも大きい。この改良は今後の課題とする。受光素子に取り付けたシリンダーは内径 1 mm 外形 1.2 mm であり、以下に示す実験においては LED 側のシリンダーは取り付けずに行なった。フォトダイオードの出力は近傍の FET で増幅する。

### 4.1 基本特性の確認

まず発光体の前面に受光素子を配置し、受光強度と距離の関係性を調べた。次にその中間地点に透過散乱体(紙)を設置し、同様に受光強度と距離の関係性を調べた。その結果を Fig. 6 に重ねて表示する。いずれの場合にも、ほぼ距離の2乗に逆比例して受光強度が減少していく様子が確認され、直接光の強度分布、散乱光の強度分布のいずれについても原理

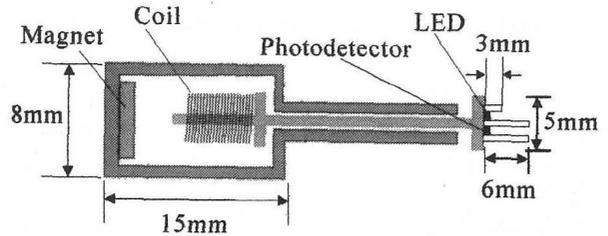


Fig. 4 A scale-up model of the micro range finder

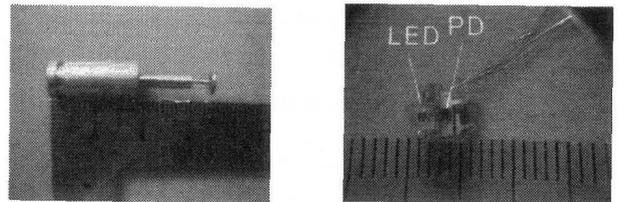


Fig. 5 Photograph of the prototype. A vibrator, left, and a sensor head without cylinders, right.

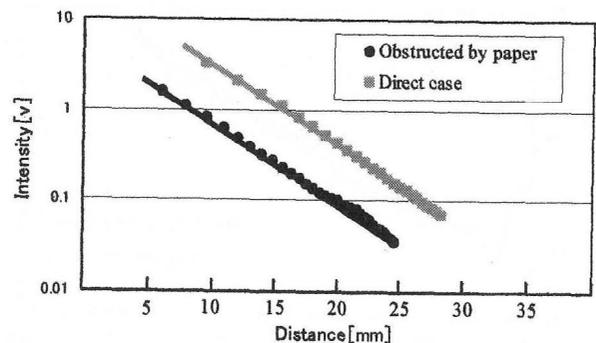


Fig. 6 Measured light intensity at various distances from the light source. Direct case ■ indicates the data when there was no obstacle between the light source and the observation point. The data when a thin sheet of paper obstructed the direct light at the middle point are plotted with ●.

で論じたような相似則と矛盾しない結果が得られた。

### 4.2 受光素子の空間的選択性

実験で用いたセンサにおいては、内径 1 mm、長さ 7 mm の金属円筒をフォトダイオードの先端に付けることによって、受光素子の観測範囲を制限している。その観測領域を評価した実験結果を Fig. 7 に示す。

受光素子に微小テスト光源(直径 1 mm、深さ 0.2 mm の穴を通して LED を発光させる)を正対させ、受光素子を横方向に  $y$  mm 移動させたときに観測された受光強度を、その横方向移動量を横軸として Fig. 7 にプロットした。受光素子と光源との距離が 1, 2, 3, および 4 cm の場合について重ねて表示してある。図に見られるように、たとえば観測面の距離を 4 cm とすると、半径 5 mm のスポットの外からの散乱光は受光素子に入射しないことがわかる。

### 4.3 基礎理論を確かめる実験

実際に光源を振動させ、センサ先端からの距離を変化させながら受光素子によって検出された光強度  $D$  および  $\Delta D$  の

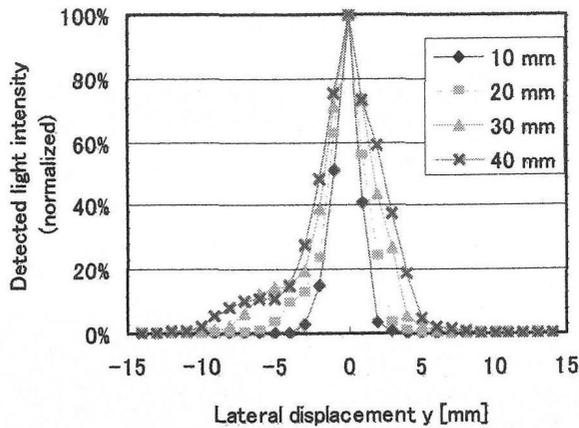


Fig. 7 Spatial selectivity of the photodetector. Detected light intensity for a point light source located on  $x=10, 20, 30,$  and  $40$  mm from the center axis of the detector cylinder. The intensities are plotted being normalized so that the peak value equals to 1.

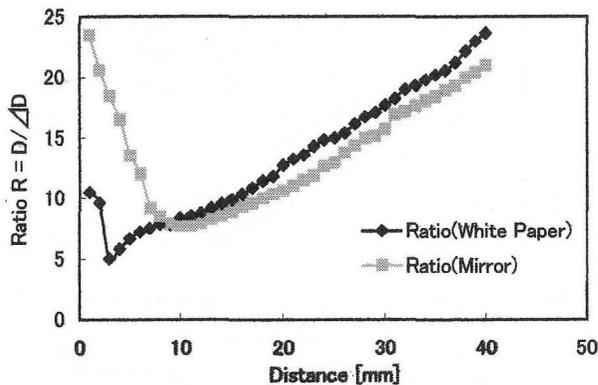


Fig. 8 Plots of the  $R=D/\Delta D$  versus distance for a mirror surface and a white paper surface

比をプロットした結果を Fig. 8 に示す。

対象面が紙のときと鏡面のときの結果をそれぞれ●, ■に示す。  $D(x)$  と  $\Delta D(x)$  の比率  $R$  は理論的予想のとおり、ほぼ  $x$  の 1 乗に比例した。対象面が鏡の場合の曲線は、紙の場合とは完全には一致していない。この理由は光源が受光素子の隣に設置され、位置にずれがあるためと考えられるが、 $10$  mm 以上の場合はそのずれを推定誤差に換算すると  $3$  mm 程度である。なお  $D$  の検出においては光源を  $200$  Hz で変調してその平均振幅を求めた。  $\Delta D$  については素子先端を振幅  $1$  mm,  $5$  Hz で矩形的に振動させ(振幅は機械的に拘束)、そのとき受光される波形の包絡線(キャリアは  $200$  Hz)の  $5$  Hz 成分から求めた。

## 5. 表面性状と傾きの影響

基本原理を確認した上、様々な対象面を取り上げて、表面性状の影響や表面の傾きの影響について調べた。

### 5.1 表面色の影響

生体表面の色は組織によって異なる<sup>9)</sup>。ここでは、対象物の表面色が測定に与える影響について調べた。対象物とし

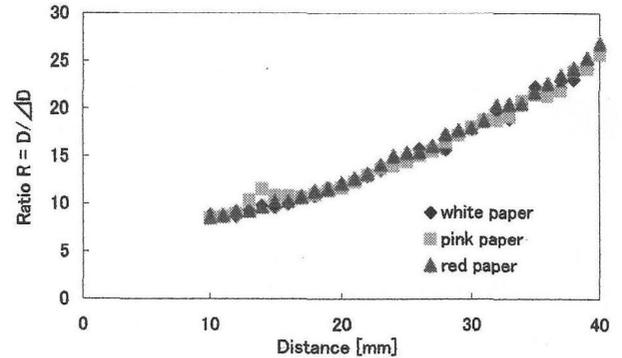


Fig. 9 Plots of the  $R=D/\Delta D$  versus distance for different color surfaces

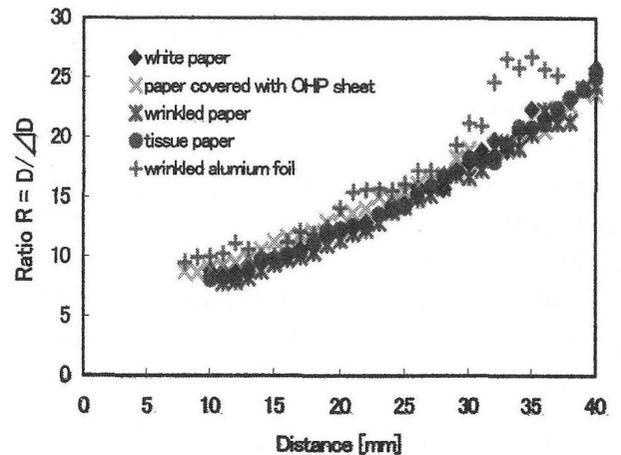


Fig. 10 Influence of surface configuration and reflection property. OHP: a white paper surface covered with a transparent OHP sheet with thickness  $0.1$  mm simulating a wet surface. Wrinkled paper: randomly wrinkled paper. Wrinkled foil: randomly wrinkled aluminum foil. The width and height of each convexity of the roughness are  $0.3\sim 2$  mm and  $0.1\sim 0.5$  mm, respectively

て、白、赤、ピンクの三色の紙を用いて先ほどと同様な比  $R=D/\Delta D$  を測定した。その結果を Fig. 9 に示す。図に示すように、比  $R$  の曲線は対象物の色に関係なく、ほぼ同比率の曲線が得られた。

### 5.2 表面性状の影響

濡れている生体組織表面からの反射光においては、鏡面反射と散乱の両成分が含まれていると考えられるが、このような状況を模擬するため、紙に透明シート(厚さ  $0.1$  mm の OHP シート)を被覆し、その表面について同様な比  $R=D/\Delta D$  を測定した。 Fig. 10 に示すように、紙の表面の場合と大きな違いはみられなかった。次に対象物の表面が平滑でない場合を評価するため、無作為にしわを作った紙と、アルミ箔について実験を行なった。しわ付き紙は  $0.1$  mm<sup>2</sup>~ $5$  mm<sup>2</sup> 程度小さい散乱反射面の突起をもつ表面であり、アルミ箔は同程度の大きさの鏡面突起をもつ表面であった。 Fig. 10 に示すように、アルミ箔については白い紙とは有意なずれが見られた。これは測定原理の章で論じたような「対象面の反射

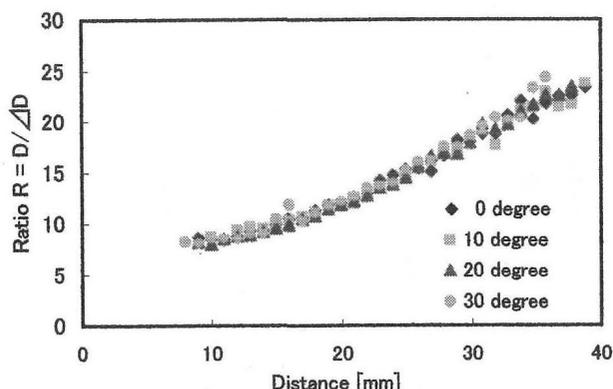


Fig. 11 Plots of the  $R=D/\Delta D$  versus distance for inclined surfaces of white paper

の特性が空間的に一様である」という前提が成り立たないためと考えられる。たとえば観測面を徐々に遠ざけて行くことを考えると、突起上の反射面と観測点を結ぶ角度は一般に変化していくから、その突起の面積が観測面の面積より十分小さいと見なせない場合(より厳密には振動による観測面の变化量より十分小さいとみなせない場合)には誤差を引き起こしうる。しかし同様な形状をもった表面においても、それが散乱性の場合には平坦な場合と有意な差は見られなかった。

次に表面だけでなく深部にまで到達した光の散乱もが混入してくる対象として、多孔性構造を持つティッシュペーパーを用いて、測定を行なった。Fig. 10 に示すように、 $R$  の計測曲線は白紙の曲線とほぼ一致した。内部からの散乱光が混入する場合には、その深さの平均的な値がおおむねの距離測定値になると考えられる。人体組織の光吸収波長特性と考えると、波長 650 nm から 700 nm の光が血液に浸透する深さは  $10^{-2}$  mm ~  $10^{-1}$  mm 未満と報告されている<sup>9)</sup>。人体組織全般においてもこれと同程度と考えてよいとすれば、本実験で用いている中心周波数 660 nm の赤色 LED 光は、組織表面から  $10^{-1}$  mm までの範囲で反射散乱されることになり、この問題は測定の障害にはならないと思われる。

### 5.3 対象面の傾きの影響

本センサがその出発点において想定した必須要件は、傾いた対象表面においても正しい測定値を与えることであった。最初の章で論じたような応用のためには非常に重要な性質である。Fig. 11 は対象物を紙とし、それを傾けた場合に比  $R$  を測定した結果である。対象面を 10 度、20 度、および 30 度傾けた場合の結果を重ねて表示したが、比  $R$  は大きく変わらず、距離推定誤差に換算して 1 mm 程度以内のずれであった。Fig. 12 は対象物として、紙を透明 OHP フィルムで被覆したものをを用いた場合の測定結果である。この場合、対象物の傾きが大きくなるにつれて、光強度比曲線も少しずつずれていく傾向がみられた。この主原因は鏡面反射成分が受光素子に戻らなくなることから受光強度が減少し、SN 比が低下したためと考えている。

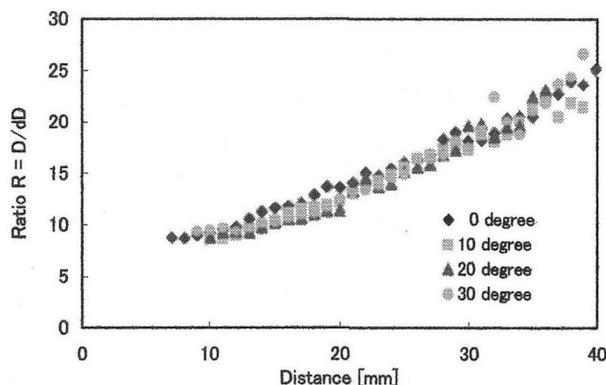


Fig. 12 Plots of the  $R=D/\Delta D$  versus distance for inclined surfaces of white paper covered with a 0.1 mm transparent OHP sheet

## 6. まとめと問題点

本論文では小型の距離センサが広い分野で必要とされていることを指摘し、その応用に適した光距離センサを提案した。点光源とその受光素子を振動させ、対象物からの散乱光強度と、振動によるその変動分を観測することで、センサ端面から対象物表面までの距離を計測する。散乱性、鏡面性、いずれの対象表面にも適用可能であり、対象表面の角度、反射率は未知でもよい。センサ自身の汚れに対しても頑強で、対象の表面からだけでなくその内部からの反射が混入しても大きな誤差を生じない。試作したセンサによって基礎原理を検証し、様々な対象物について測定の精度を評価した。その結果、特に数 mm 程度の凹凸鏡面をもつ対象以外では、測定範囲 30 mm までの測定精度は  $\pm 2$  mm 程度以内であった。なお 10 mm より近い場合は測定不能であるが、これはセンサの基準位置を後方にずらせば良いので応用上問題となることは少ないと考えられる。

今後はこれを舌位置センサに応用する研究や内視鏡下外科手術における距離センサへと応用する研究に発展させていきたいと考えている。舌運動センサは、発音と舌位置との明確な関連を見出す研究、中国語発音学習法の開発、発音運動の混乱を抱える言語障害者の診断・治療、あるいは新しいコンピュータインターフェースとしての無声通信などへも応用可能であると考えている。

最後には本手法の限界あるいは問題点を整理しておく。本計測原理は式(3)に書かれるような相似性を基礎にしているため、これが成立しない対象には適用ができない。観測範囲の中心から外側に向かって著しく変化する反射率分布が生じてしまっている場合や、観測範囲と同程度の粗さをもつ凹凸鏡面によって表面が構成されている場合には大きな誤差を生じてしまうと考えられる。個別の応用に際し、これらがどの程度影響するかを今後吟味していく予定である。また現段階の試作センサにおいては駆動部分が大きく目標である 1 mm 程度のサイズにはまだ到達していない。ソレノイドによる駆動は小型化が困難であるため、現在空気圧による駆動方法を

開発中である。

### 付録～三角測量の測定誤差

二つの基準点を A および B とし、その間の距離を  $a$  とする。目標点を C として  $\angle ACB$  を  $\theta$  とすると目標点までの距離  $l$  と  $a$  および  $\theta$  は

$$l\theta \approx a$$

であるから、 $\theta$  の測定誤差と距離  $l$  の推定誤差の関係は

$$\delta l = \frac{a}{\theta^2} \delta \theta = \frac{l^2}{a} \delta \theta$$

で与えられる。したがって  $l$  および  $\delta \theta$  を一定とすると  $l$  の測定誤差は  $a$  に反比例する。

### 参考文献

- 1) 竹林, 渡邊, 清水, 斎藤: 初級英語音声学, 大修館出版社, 19/21, 31, 41, 51, 59/64, 78, 186/188 (1992)
- 2) 張志公(編): 現代漢語, 人民教育出版社, I, 11/12, 16/21 (1982)
- 3) G. J. Borden & K. S. Harris 著, 廣瀬肇訳: ことばの科学入門, メディカルリサーチセンター, 88/120(1994)
- 4) 及川慶浩: 腹腔鏡の手術とその看護, 小学館, 7/8, 20/21, 32/35(1995)
- 5) 王, 劉, 篠田: 舌運動計測システムと中国語発音学習への応用, 電気学会論文誌 E, **119**-4, 209/214(1999)
- 6) 井口征士: 広がりをもせる 3次元計測技術, 計測と制御, **31**-9, 968/947(1992)
- 7) M. Rioux: Laser Range Finder Based on Synchronized Scanners, Applied Optics, **23**-21, 3837/3844 (1984)
- 8) センサハンドブック: 培風館, 427/429(1986)
- 9) 久保守市: 医用レーザー入門, オーム社, 70/72(1985)

### [著者紹介]

#### 王 欣 雨 (学生会員)



1996年東京農工大学工学部電子情報工学科卒業。同年同大学大学院電子情報工学専攻博士課程入学。投稿当時専攻博士後期課程。現在科学技術振興事業団光学用新材料チーム研究員、工学博士。言語に関連する新しい計測・学習システムや光学用新材料による光センサの開発に興味をもつ。日本中国語学会会員。

#### 劉 忻 (正会員)



1998年東京農工大学工学部電子情報工学科卒業。2000年同大学大学院電子情報工学専攻修士課程修了、工学修士。光による生体計測システムに興味をもつ。現在オリンパス光学工業(株)勤務。

#### 篠 田 裕 之 (正会員)



1988年東京大学工学部物理工学科卒業。90年同大学院計数工学修士、90年より同大学助手、95年博士(工学)。同年より東京農工大学講師、97年より同助教授、99年 UC Berkeley 客員研究員、2001年より東京大学情報理工学系研究科助教授。触覚を中心としたセンサシステムとデバイス、触覚ディスプレイ、光・音響計測などの研究と教育に従事。94年佐藤記念知能ロボット研究奨励賞、93年、94年、98年計測自動制御学会論文賞、98年日本機械学会部門賞、99年 IEEE ICRA The Best Conference Paper Award 受賞。電気学会、日本機械学会、日本 VR 学会の会員。