

# カオス超音波センサを用いた距離と横方向位置検出

Chaos supersonic sensor detectable distance and lateral position

伊藤 陽人†, 名和 靖彦††, 津田 紀生†††, 山田 諄†††  
Akito Ito, Yasuhiko Nawa, Norio Tsuda, Jun Yamada

**Abstract:** Compact and low cost supersonic sensor with relatively high accuracy in the short-ranges has used for sensor of the unmanned truck and robots. However, supersonic sensor may malfunction by sound noise in factories or by interference with another supersonic sensor. Because supersonic wave spreads, supersonic sensor would also detect object in lateral position. A new type supersonic sensor using one receiver and two transmitters can detect not only a distance between the object and sensor but also a lateral position. At a distance of 2.5m, this sensor can detect the lateral area of  $\pm 40\text{cm}$ . It is confirmed that the sensor can measure a distance with average error of 4%.

## 1. はじめに

近年、超音波を用いたセンサは、産業用ロボットの距離検知や工場内の無人台車用のセンサなど、衝突防止や距離検知の研究が行われている。これらの技術を実現する上で、他の物体や歩行者などの検出を行う各種センシング技術が重要であり、その中で工場内の車載用レーダとして超音波センサが多く研究されている。

超音波センサは、非常に安価で近距離測定に関しては比較的精度が高いため、移動型ロボットや無人台車用のセンサなど、さまざまな物に用いられている<sup>1)</sup>。しかし超音波センサは、工場などの騒音やノイズのある環境、超音波センサを複数台使用する場合において、それぞれのセンサから発振された信号が干渉し、誤作動を起こしてしまう恐れがある。

本研究室では、レーザレーダの変調にカオス信号を用いることで、ノイズに強く、長距離を測定することができ、また加算のみの処理で測定を行えるカオスレーザレーダの研究を行ってきた<sup>2)</sup>。そして、信号処理に FPGA を用いることで実時間処理が可能であるなど、カオスレーザレーダの有効性が確認されている<sup>3)</sup>。

カオス超音波センサでは、比較的ノイズに強く、加算

のみで高速処理できる新しいタイプの超音波センサが研究されていた<sup>4)</sup>。これは、ランダム信号であるカオスまたはノイズ信号で変調をかけて超音波を発振させる。そして、ターゲットから反射して戻ってきた受信信号を進ませ、加算するという簡単な信号処理により遅れ時間を求める方法である。これは、一般に相関関係をとるには、乗算と積分を繰り返して計算するため処理時間がかかるが、本研究では加算を 1 回行うだけなので、処理時間が速くなる。また非周期的なノイズ信号を用いて変調をかけるため、ある程度ノイズに強く、混信に強い。

しかし、無人台車に搭載する事を考えた場合、直線距離だけでなく、対象物の横方向位置を検出することが必要である。超音波はレーザに比べて空間分解能が良くなく本来、衝突することがない条件でも停止してしまうことがある。例として、壁に沿って進んでいるときに無人台車は正面に物体がないにも関わらず、横にある壁を物体と認識して停止してしまうことがある。

そこで、本研究では、送信部 2 つ、受信部 1 つを用いることで 2 つの距離差からセンサと対象物の間の距離差だけでなく、横方向位置を求めることを目的として研究を行った。

## 2. 測定原理

測定原理を図 1 に示す。送信信号（カオス信号）を 0,1 に 2 値化する。送信信号の最初の立ち上がり時間を基準時間とし、それに続く立ち上がりの時間差を順に  $\tau_1, \tau_2, \tau_3 \dots$  と置いていく。受信信号も 2 値化を行い送

---

† 愛知工業大学 工学研究科  
電気電子工学専攻(豊田市)  
†† 愛知工科大学 工学部  
電子制御・ロボット工学(蒲郡市)  
††† 愛知工業大学 工学部 電気学科(豊田市)

信号で求めた時間差  $\tau_1, \tau_2, \tau_3 \dots$  だけ受信信号を進ませる。そして、移動された受信信号をすべて加算すると、0 から加算個数の値へと急激に変化する点が現れ、他の点では加算個数の 1/2 の値に収束した値をとる。加算信号が最大のピークに達する前に 1/2 の値の直線と交わる点と、基準時間との時間差が送信信号との遅れ時間となるため、この値に音波の速度を掛けることによって目標物までの距離を測定できる。この原理を利用することで、加算のみで処理するため、従来方式よりも簡単に処理ができる。更に、ノイズにより受信信号が分離・結合し送信信号と一部違った場合でも、加算信号のピーク値が減少するだけで位置は変化しないため、ノイズによる影響を受けにくい。

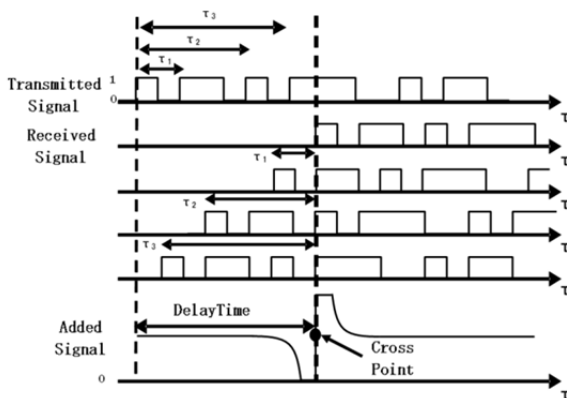


図 1 測定原理図

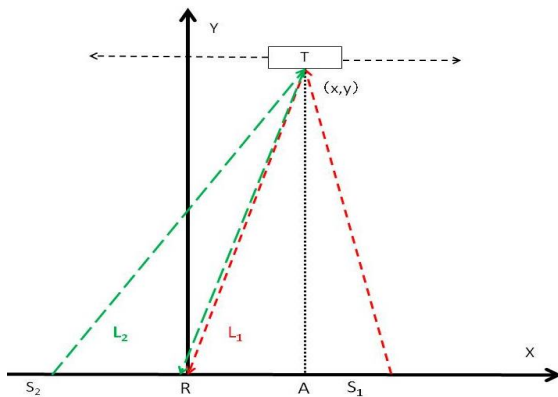


図 2 横方向位置検出原理図

2・1 横方向位置検出原理

本研究で行った横方向位置検出について測定原理を図 2 に示す。対象物の位置を求めるには、2 次元的に考える必要がある。そこで、本研究では、送信機 2 つと受信機 1 つを用いて、対象物までの距離と横位置を求めた。対象物の横方向位置を求めるために、横軸を X、縦軸を Y とする。受信機 R を中心(0,0)として、送信機 S<sub>1</sub> と S<sub>2</sub> の位置をそれぞれ(a,0)、(-a,0)とする。送信機 S<sub>1</sub> からでた信号が対象物 T にあたり戻ってきた反射波を受信機 R で受信し距離 L<sub>1</sub> を求める。求め終えたら、手動でスイッチを切り替え、今度は送信機 S<sub>2</sub> からでた信号が対象物 T にあたり戻ってきた反射波を受信機 R で受信し距離 L<sub>2</sub>

を求める。L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>を求めるために、対象物から X 軸に垂線をおろしその交点を A とし、2 つの直角三角形△ART、△AS<sub>1</sub>T の斜辺の和として次のように求める。

$$\sqrt{(x+a)^2 + y^2} + \sqrt{x^2 + y^2} = L_1 \quad \dots \text{式(1)}$$

$$\sqrt{(x-a)^2 + y^2} + \sqrt{x^2 + y^2} = L_2 \quad \dots \text{式(2)}$$

式(1)、式(2)の連立方程式を解くことにより、以下の結果を得る。

$$x = \frac{L_1 L_2 (L_1 - L_2)}{2a(L_1 + L_2)} \quad \dots \text{式(3)}$$

$$y = \sqrt{\left\{ 1 - \frac{a(2x+a)}{L_1^2} \right\}^2 - \frac{4x^2}{L_1^2}} \quad \dots \text{式(4)}$$

式(3)、式(4)より対象物の位置(x,y)を求めることが出来る。

3. 測定システム

本研究で使用した測定装置を図 3 に示す。測定装置は、送信部、受信部、処理部の 3 つから構成した。送信信号は 20.48MHz の水晶発振器から FPGA により、40.96kHz のパルス信号と、LFSR 回路を通して作られた平均周波数約 1kHz(最大約 4kHz)のカオス信号との AND を取り作製した。作られた信号を、増幅回路に通しカオス信号を 15V まで増幅し、送信部に取り付けたセンサに送った。センサから発振した超音波は対象物にぶつかり、受信部のセンサで反射波を受信する。受信した超音波は微弱なため、増幅回路を通して増幅し、コンパレータを通して信号をパルス化し、再度 FPGA 内に入れて処理をする。その後、セグメント表示を行い、距離を求めた。

3・1 送信部

送信部は、FPGA、増幅回路、超音波センサで構成した。送信信号は、20.48MHz の水晶発振器から FPGA により、約 41kHz のパルス信号と、LFSR 回路を通して作られた平均周波数約 1kHz のカオス信号(最大約 4kHz)との AND を取ることで作った。増幅回路は、オペアンプ [LM6361]を使用した。駆動電圧は、+15V とした。

### 3・2 受信部

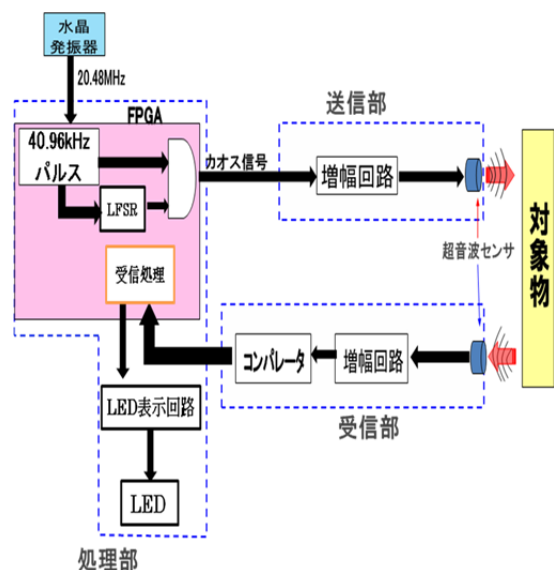


図3 測定装置

受信部は、超音波センサ、増幅回路、コンパレータで構成されている。目標物にあたり反射したカオス信号を超音波センサで受信、増幅後、コンパレータを通してデジタル信号に変換している。受信信号は非常に小さく、そのままでは測定が困難であるため、増幅器を通して受信信号を増幅した。本実験では、オペアンプ[uPC4570c]を使用して増幅器の作製を行った。コンパレータは、2つの電圧を比較し、どちらが大きいかで切り替わる素子で、増幅回路を通し増幅した後、コンパレータによって信号をパルス化した。負帰還をかけていない標準的なオペアンプはコンパレータとして使用できる。受信信号を整流するため[uPC358]を使用した。

### 3・3 処理部

処理部はFPGA、セグメントLEDから構成されている。受信した信号をFPGAで処理し、その値をセグメントLEDで表示する。FPGAを用いて測定原理に示した送信信号と受信信号の遅れクロック数で計算し、リアルタイムでLEDに表示する。

## 4. FPGAでの処理

FPGAとは、Field Programmable Gate Arrayの略称であり、使用者が希望する論理機能をPCを使って短時間で実現し、何度でも書き換え可能な安価なデバイスであるXCF02Sを用いた。設計は、Xilinx社ISE12.1\_1を用いてVHDLで行った。FPGAは電源を切るとプログラムした論理回路を保持できない。そこで、コンフィグレーションROMとしてEXO-36Aを使用し、これによりFPGAに

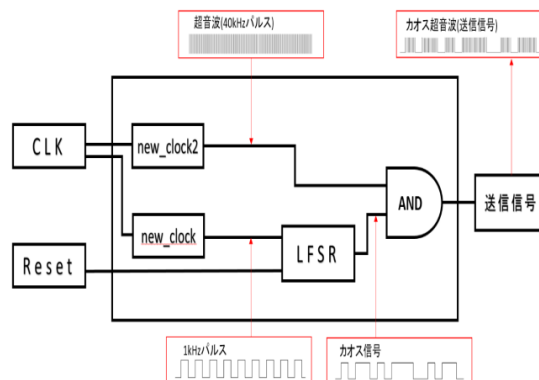


図4 送信信号の処理

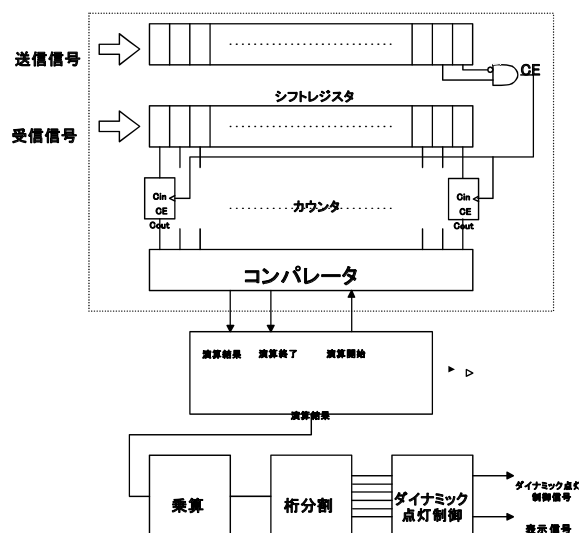


図5 受信処理

電源を入れたときにROMからFPGAにプログラムをロードすることで、パソコンと切り離しても使用できるようにした。このブレッドボードには水晶発振器を取り付けるパターンがあり、そこに20.48MHzの水晶発振器を取り付けクロック源とした。FPGAでは送信信号の生成と受信処理と距離の算出、セグメントLEDの制御を行う。

### 4・1 送信側処理

送信信号の作製方法について記述する。送信信号の処理を図4に示す。clk(20.48MHz)を分周させnew\_clockで約1kHzのパルス信号を生成し、この信号をLFSRによってカオス信号にする。またnew\_clock\_2で約41kHzのパルス信号を生成し、この2つの信号をAND回路に通すことで送信信号であるカオス超音波を生成した。

#### 4・2 受信側処理

測定原理に基づいた処理を行い、遅れクロック数を算出する演算部 (receive) について説明する。受信処理を図 5 に示す。送信信号を 256 ビットのシフトレジスタでクロックに同期させ 1 クロックごとにシフトさせる。送信信号の下位 2 ビットからゲートにより立ち上がりを検出し、CE (Counter Enable) を出力する。受信信号も同様にシフトレジスタで 1 ビットごとにシフトさせ、CE が High のときにカウンタで加算を行う。そして、加算を何度か繰り返し、最大となったカウンタをコンパレータで検出する。この最大値となったカウンタが遅れクロック数をあらわす。シフトレジスタでのシフトは測定原理での移動処理を表し、CE の出力が立ち上がりの時間差の算出を表す。そして、カウンタでの加算が測定原理の加算処理を表す。この加算を繰り返し最大値を検出することで測定原理での加算信号の最大のピークの検出を表す。

### 5. 測定結果

今回使用した村田製作所の (MA40S4S/R) はセンサにおいて一番感度が良いとされているカタログ値(公称値)は 40kHz であるが、個別のセンサでは最高感度周波数にバラツキがある。そこで、実際に本研究で使用した超音波センサがどの周波数において感度が良いか調べた

実験方法として、ファンクションジェネレータを送信センサにつなげ、距離を 10cm 離して受信センサで受信しオシロスコープで電圧を確認した。ファンクションジェネレータの設定は 40kHz から 41.5kHz の間で実験を行った。測定結果を図 6 に示す。測定結果より、周波数 40kHz 時が 0.7V に対して、周波数 41kHz 時は 1.7V と約 2.3 倍感度が良い事が分かった。

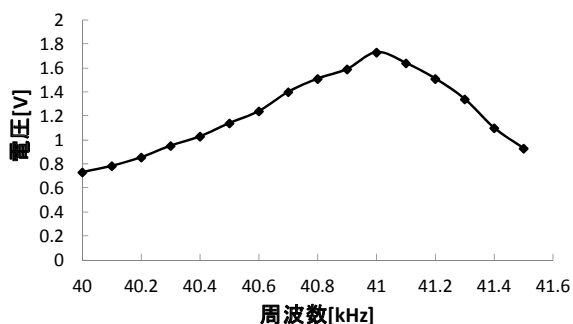


図 6 感度測定結果

#### 5・1 新しい水晶発振器の試行

本研究で使用している超音波センサの感度は 41kHz の

感度が一番良いため、水晶発振器を 20MHz から 20.48MHz に変更した。クロックを変更したことにより、どの程度精度が良くなったかを確かめるため、直線距離を測定した。対象物は、アルミニウムの箱(縦 20cm、横 15cm)を用い、地面との反射を抑えるため、対象物と検出器を、地面から 1 m の高さに上げて測定した。今回測定した距離は 1m から 3m までである。実験結果を図 7 に示す。実験結果より、全体の平均誤差は 2.32% で水晶発振器を変更しても精度よく測定出来ていることが確認できた。

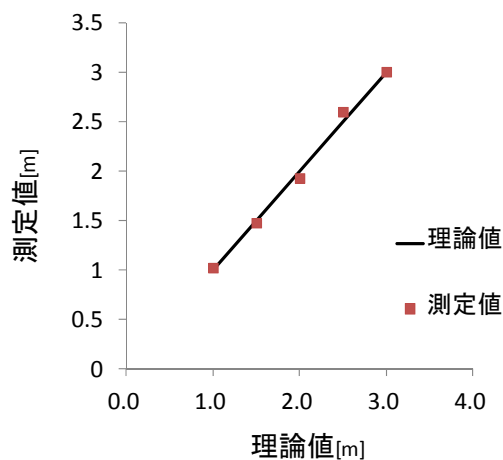


図 7 直線距離測定結果

#### 5・2 横方向位置検出

横方向位置検出の実験方法として、測定原理図で説明した図 2 を使って説明する。

送信機  $S_1$ 、 $S_2$  の位置を (30 cm, 0) (-30 cm, 0) とした。送信機  $S_1$  からでた信号が対象物 T にあたり、戻ってきた反射波を受信機 R で受信、その距離を  $L_1$  とする。同様にして、手動でスイッチを切り替え、送信機  $S_2$  と受信機の距離を  $L_2$  とする。 $L_1$  と  $L_2$  を求める式を連立させ、対象物の位置 (x, y) を求めた。

直線距離測定と同じ条件で測定を行い、対象物を図 7 のように左右に 10cm 間隔でずらし横方向位置およびその時の直線距離を求めた。対象物の横方向位置検出の実験結果を図 8、図 9、図 10、図 11 にそれぞれ示す。図 8、9 は 2.5m 時の横方向位置の測定値と誤差を表している。図 8 より、横方向位置  $\pm 40$ cm までは検出出来ていたが  $\pm 50$ cm においては理論値と大きくずれてしまった。図 9 より誤差を見てみるとバラツキが大きくみえる。超音波センサの感度結果より角度が広がるほど感度が下がるため、検出範囲が広がると信号が弱くなるためと考え

## カオス超音波を用いた距離と横方向位置検出

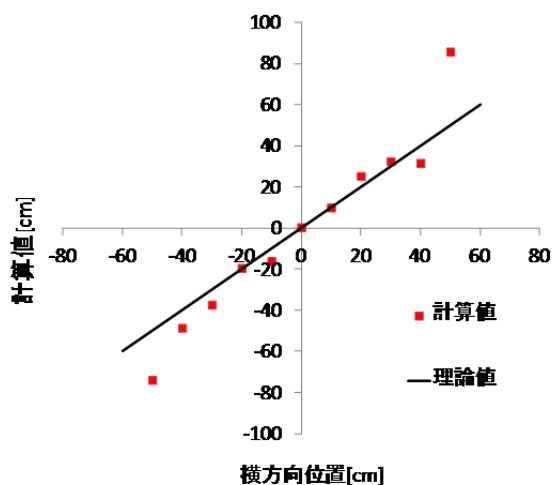


図8 横方向位置結果

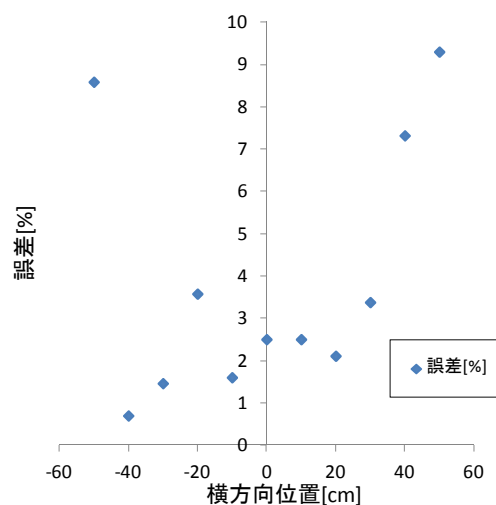


図11 直線距離誤差

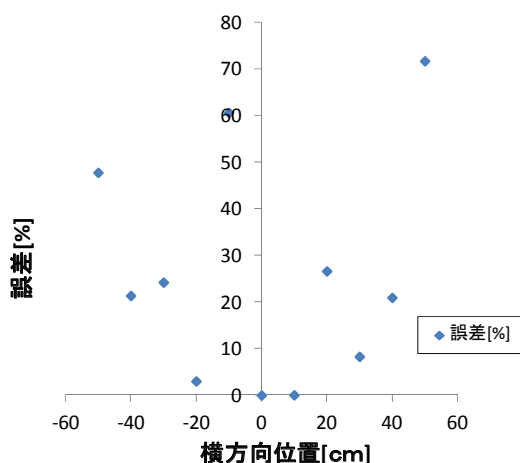


図9 横方向位置誤差

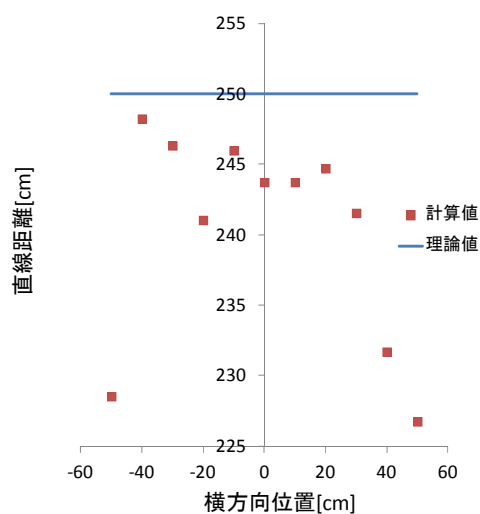


図10 直線距離結果

られる。図10、11は2.5m時の直線距離の計算値と誤差を表している。図10より、横方向位置-40cmから+30cmの間では誤差10cm以内に収まっているが+40cm、±50cmにおいては、誤差が20cm前後と大きくなっている。図11の直線距離誤差[%]を見ても全体の平均誤差は3.91[%]であるが、最大誤差は+50cm時の9.3[%]と約2倍以上になっている。また、図5の2.5m時の直線距離誤差3.6[%]と比べても大きくなっている。これは、横方向位置を求める際に測定して得た数値を単純に2倍してL1、L2とし、式(3)式(4)に代入して計算したため誤差が生じたと考える。また、直線距離3m時も同様に測定を行った結果、2.5m時よりも横方向位置±10cm広くとれ、直線距離も全体の平均誤差は5.38%と測定出来ていると思われる結果が得られた。

## 6. 総括

今までのカオス超音波センサでは、送信部と受信部が一对しかなかったためセンサと対象物との間の直線距離しか測定できなかった。本研究において、センサと対象物との間の直線距離だけでなく横方向位置を検出することを目標に送信部を2つ、受信部を1つ使用することで、ある程度の横方向位置を検出出来るという結果を得ることが出来た。また、本研究で使用している超音波センサは周波数40kHzよりも41kHzの方がセンサとしての感度が良いこともわかった。この結果より、本研究で使用していた水晶発振器を20MHzから20.48MHzに変更し、周波数40.96kHzを作ることが出来た。

送信部2つ、受信部1つを用いることで、直線距離2.5m、3mにおいてそれぞれ±40cm、±50cmの範囲においてある程度の位置検出が出来た。さらに、その時の、直線距離も測定出来ていることも確認できた。

本研究の今後の課題として測定出来る直線距離を伸ばし、その時どこまで横方向位置が検出出来るかを調べたり、超音波センサの数を増やすことで検出出来る範囲を増やしたりすることである。また、現在のプログラムでは、ひとつのデータを取るのに時間がかかるうえ、数値のバラツキもあるためプログラムの改良し、マイコンを用いて FPGA を制御して自動で測定出来るようにすることが考えられる。

#### 参考文献

1) 塩山忠義：「センサと原理の応用」, 森北出版, p.180 (2002)

- 2) 中川達也・津田紀生・山田諄：「カオスレーザーレーダの FPGA を用いたオンライン計測」, 電学論 C, Vol.125, No.12, pp.1824-1829 (2005)
- 3) 成田義之・津田紀生・山田諄：「カオスレーザーレーダを用いた衝突防止センサの研究」, 電学論 C, Vol.123, No.12, pp.2079-2084 (2003)
- 4) 木全祐貴・津田紀生・山田諄・名和靖彦：「FPGA を用いたカオス超音波距離計」, 電学論 C, Vol.133, No.4, pp.831-836 (2013)

(受理 平成 26 年 3 月 19 日)