

超音波アレイセンサを用いた 貯槽内粉面計測システム*¹

森元映治*²・大崎榮喜*²・和田憲造*³・
糸井 茂*³・江川直喜*⁴・Asif Šavanovic*⁵

Measurement System for Granular Surface Profile in Storage by Ultrasonic Array Sensor*¹

Eiji Morimoto*², Eiki Osaki*², Kenzo Wada*³,
Shigeru Itoi*³, Naoki Egawa*⁴, and Asif Šavanovic*⁵

An ultrasonic system with a linear array sensor adopting a holographic method is developed to measure the two-dimensional cross section profile of a granular surface during storage. The system using a 40 kHz ultrasound composed of one transmitter is located in a storage center and two linear array receivers consisting of 8 sensing elements. Preliminary tests have provided data for efficient network training, network architectures, and learning conditions for the measurements. A fully connected multilayered neural network trained by 13 surface profile patterns is used to eliminate any virtual image which emerged mainly due to irregular reflection by the inner wall surface and wave interference. The surface images reconstructed by the trained network with a back propagation algorithm are sufficiently accurate for the estimation of fundamental surface patterns which are generally formed in the hopper according to the conditions of charge and discharge of the granular materials.

1 はじめに

粉粒体を取り扱うプロセスにおいて、貯槽は材料を一時的に蓄え要求に応じて間欠的に供給・排出したり、製造工程の各所において生産ライン上の材料の流れを

連続的に調整する目的で使用される。したがって貯槽内容量を検知することはプロセス全体を円滑に管理運転する上から重要である。内容量を測る方法には従来より種々のものがあるが特定の位置のみを計測するた

水産大学校研究業績 第1602号, 1998年10月9日受付.

Contribution from National Fisheries University, No.1602. Received Oct. 9. 1998.

*¹ 粉体工学会秋期研究発表会(平成4年)にて発表.

*² 水産大学校海洋機械工学科海洋環境工学講座(Laboratory of Ocean Environmental Engineering, Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University).

*³ 山口大学工学部機械工学科(Department of Mechanical Engineering, Yamaguchi University).

*⁴ 鐘淵化学工業(株)(Kaneka Cooperation).

*⁵ TUBITAK-Marmara Research Center, Turkey.

め粉粒体系に特有な流入出の時に生じる表面形状の変化に対応することが難しい。また環境条件により異なるが、一般に粉粒体系では発塵した微粒子が機器へ付・固着しトラブルを起こしやすい^{1,2)}。このような条件下で用いるに有効な測定原理の一つとして筆者らは超音波による方法に注目し、特に内容量の計測とあわせて貯蔵状態を把握できることから、粉面形状（貯蔵粒体の上部表面形状）を認識する方法について検討を行ってきた^{3~6)}。この方法によれば粉粒体の3次元的貯蔵状態を検知し得るため、陸上における貯槽施設での計測に有効であると同時に、特に船舶においては船倉内の積み荷のバランスに関する情報を与えるため、安全航行上有用な計測法の一つとなり得ると考える。本報では粉面形状認識のためリニアアレイ形のセンサを用い、ホログラフィックな手法によって計測時間と精度の面から良好な測定が実現できることを示した。さらに測定精度を向上させる目的からニューラルネットワークによる手法を導入し、計測画像に生じる虚像の除去を試みた。

2 測定装置及び方法

2.1 装置構成

計測系の構成をFig. 1に示す。送波回路は計算機からの指令により40kHz, 250V_{p-p}の信号を送波器に送り超音波が発信される。被測定体である粉面からの反射波は受波器で捕捉され、受波回路, A/D変換器を経て計算機に入り処理される。受波器は8個の素子を10mm間隔で直線状に並べたものを1組とするリニアアレイ形で、送波器の両側に2組が配置され、周期6.25 μ secでサンプリングされる。送波器および受波器はそれぞれコンデンサ形, バイモルフ形で、それらの仕様をTable 1に、また指向特性をFig. 2に示す。計測領域は送波器位置を原点として水平方向(x軸)に ± 400 mm, 鉛直方向(h軸)に300mm~800mmである。被測定体は平均粒径317 μ m 安息角36.1°の砂であり、矩形水平断面をもつ貯槽（上開口部幅 \times 奥行: 855mm \times 575mm)中に貯蔵し、通常条件で粉体を流入、排出した場合に生じる上表面形状（水平面, 斜面, 凹形面, 凸形面）を計測した。

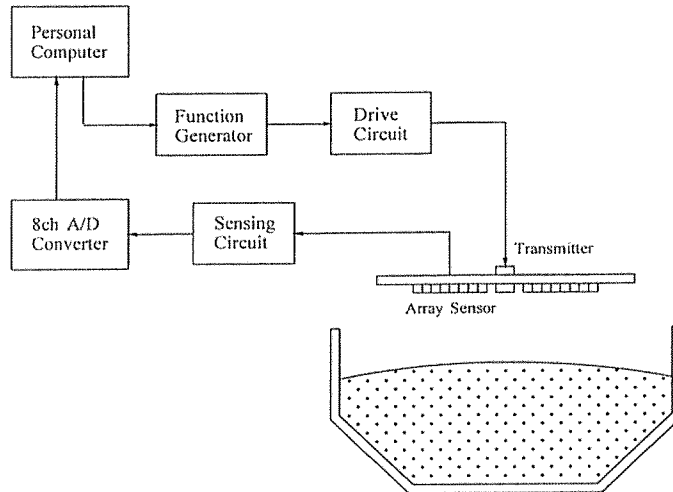


Fig. 1. Experimental Apparatus

Table 1. Properties of Transmitter and Sensing Element

(1) Transmitter

transmission sensitivity	110 dB (300 Vp-p at 1m)
receiving sensitivity	-42 dB (1 V/Pa)

(2) Sensing Element of Array

frequency	40 kHz
sensitivity	-74 dB
sound pressure	more than 100 dB
directivity	more than 100 deg
range detectable	0.2~4 m

2. 2 計測アルゴリズム

測定は逆伝播映像法⁷⁾に基づき、粉面からの反射波をホログラフィックに計測し、超音波の往復伝播時間から反射位置を同定し断画像を再生する。手順としては；①超音波を発信する，②リニアアレイセンサで超音波を受信する，③センサ出力をA/D変換する，④データを計算機メモリに記憶する，⑤計測領域上の格子点Pを指定する，⑥受波センサRを指定する，⑦送受波器経路の伝播時間 t を算出する，⑧時間 t に対応するデータを取り出す，⑨全てのセンサについてデータを取り出したか確認する（そうでなければ⑥へ戻る），⑩全データを加算する，⑪全格子点についての処理を確認する（そうでなければ⑤へ戻る），⑫鉛直方向に再生最大強度を求める，⑬虚像と見なされる格子点を

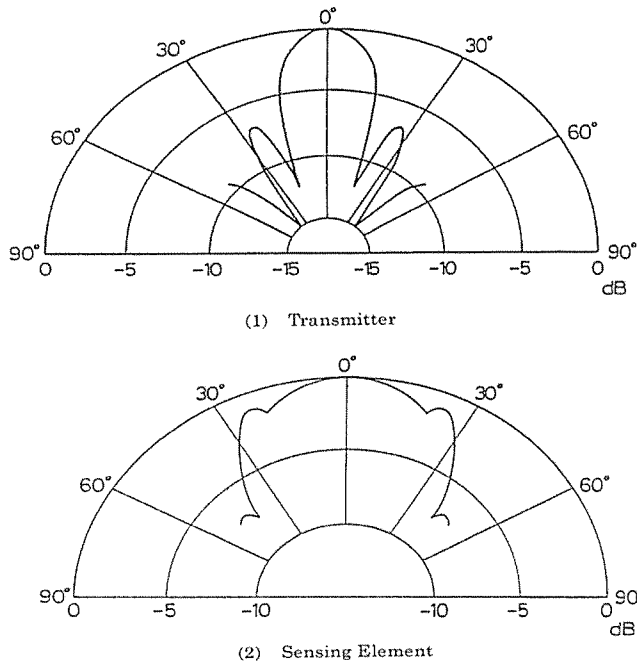


Fig. 2. Directivity of Transmitter and Sensing Element

除去し、画像をモニタに表示し終了する。以上をFig. 3にフローチャートとして示す。

2.3 予備の設定

実験より送波条件を設定した。再生点と他の部分からの反射波の干渉を低減させるためには超音波の送波時間は短いほうがよいが、短かすぎると十分な受信出力が得られず、逆の場合には干渉による虚像が生じやすくなる。これらを実験的に検討し送波時間を決定した。また粉面再生点と再生強度の誤差を調べ虚像を生じる強度をしきい値として設定した。

3 計測画像の改善

3.1 ニューラルネットワーク

計測では反射波から被対象物の位置を同定するため乱反射による影響を受けやすく虚像が生成される場合がある。特に貯槽内部での測定のような壁面に閉ざされた空間内では槽の周囲部で乱反射波の影響が強あらわれる。このような虚像を除去する方法としてニューラルネットワークを用いた。ネットワークは完全結合の階層型で、中間層を1層とし、学習はバックプロパゲーション法によった。得られた粉面形状の補間曲線データを用い、水平方向に一定間隔で読み込んだ x_n における鉛直方向のデータ $H(x_n)$ を作成する。一般のパターン認識においては平面内の2次元パターンを水平及び垂直方向に分割したマトリクスにより表現し処理するため、水平と垂直方向の分割数の積に相当する画素数に対応した入力層及び出力層を持つネットワークを構成する必要がある。これに対し水平方向に一定間隔に分割された位置での高さ方向のデータを用いることにより入出力層のユニットを一次元に減少する事ができ (Fig. 4), このことによって学習の高速化が図られる。高さ方向のデータは実際の計測ではある適当な測定領域を設定することができるから、これを基準として正規化を行った。さらに粉面の位置が変化し

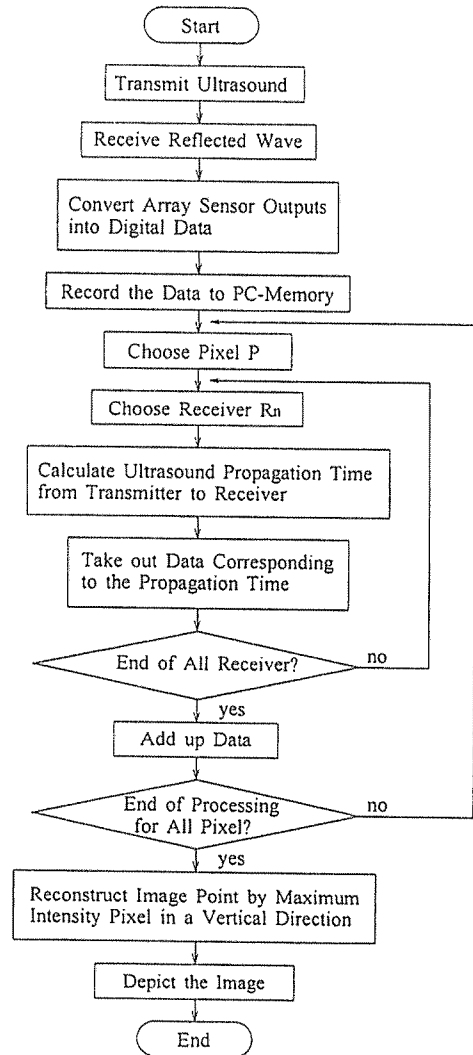


Fig. 3. Measurement Algorithm

ても正規化した値の平均が変わらないようにバイアスを与え、ネットワークの学習パターンを軽減させた。応答関数としてはシグモイド関数を用い、ユニット入力 u と出力応答 y を調整して $y=1/(1+\exp(-u/0.8))$ とした。

3. 2 ネットワークとデータ構造

ネットワーク構造を検討するために条件を変えて学習をおこなった。学習時間を短縮するため水平方向のデータ領域を全貯槽領域の $1/2$ (中央より $\pm 200\text{mm}$) に限定したデータをテスト用として用いた。

データ構造としては、測定位置 x_n と粉面高さ $H(x_n)$ からなるデータ集合 $\{D_1(x_n, H(x_n))\}$ と、これに各点の受信波強度 $I(x_n)$ を情報として加えたデータ集合 $\{D_2(x_n, I(x_n), H(x_n))\}$ をトレーニングデータに用い、両者を学習させ比較した (Fig. 5)。この結果、学習状況を Fig. 6 に示すように、最終誤差はデータ $\{D_2\}$ のほうが約 $1/6$ 倍程度小さかった。また水平面と凹形面の二例について粉面像を Fig. 7, Fig. 8 に比較して示す。

中間層ユニット数の効果について見るため、前述のデータ $\{D_2\}$ を用い、ネットワーク構造 (入力層 \times 中間層 \times 出力層の各ユニット数) ; $80 \times 40 \times 40$, $80 \times$

60×40 , $80 \times 80 \times 40$ で学習回数を 2000 回とした。この結果、3 種の中間層構造のネットワークの学習結果に大きな差異は認められなかった。

さらに学習パターンとして 13 種 (水平面 : 1 種類, 斜面 : 6 種類, 凹形面 : 3 種類, 凸形面 : 3 種類) の異なる粉面パターンを用い、学習の順序について一定の順序付けをした場合とランダムに学習する場合とで比較した。後者の場合、学習の途中で誤差の変動を伴いつつ誤差が収束するが、最終的な結果においては両者に著しい差異は認められなかった。

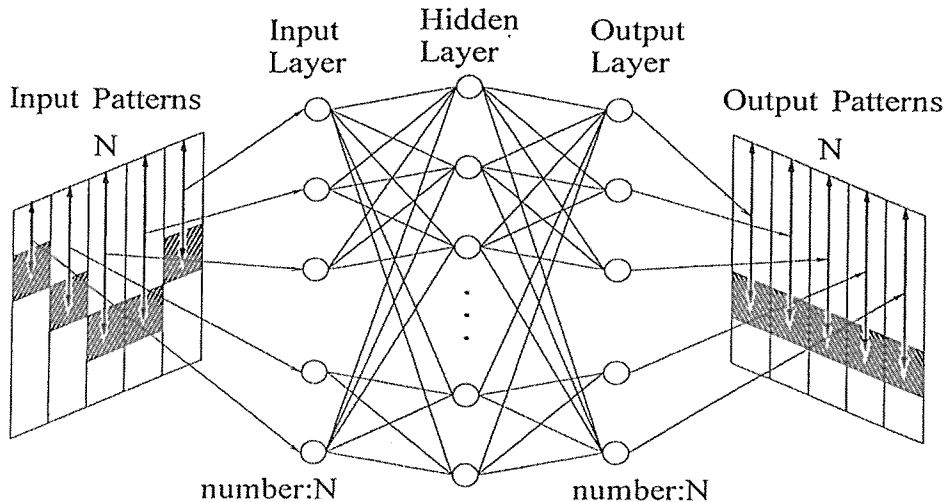


Fig. 4. Structure of Neural Network

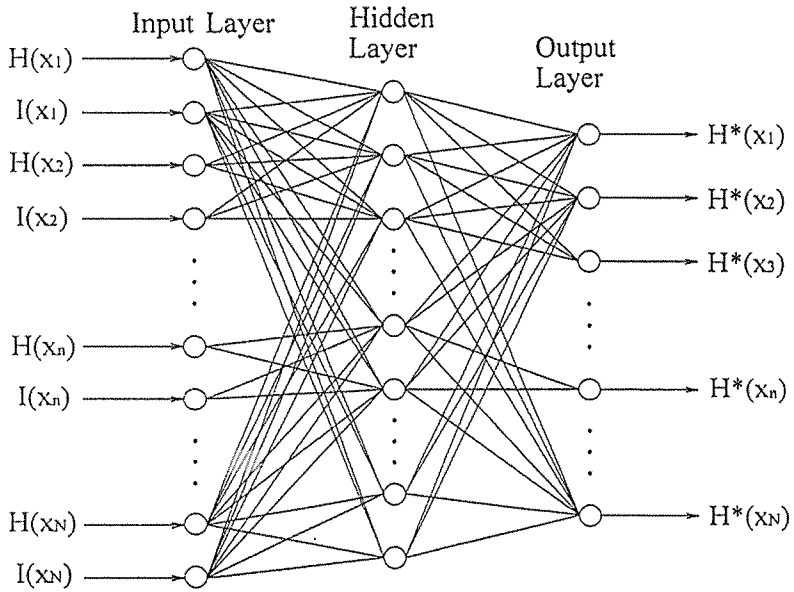


Fig. 5. Training Data and Neural Network

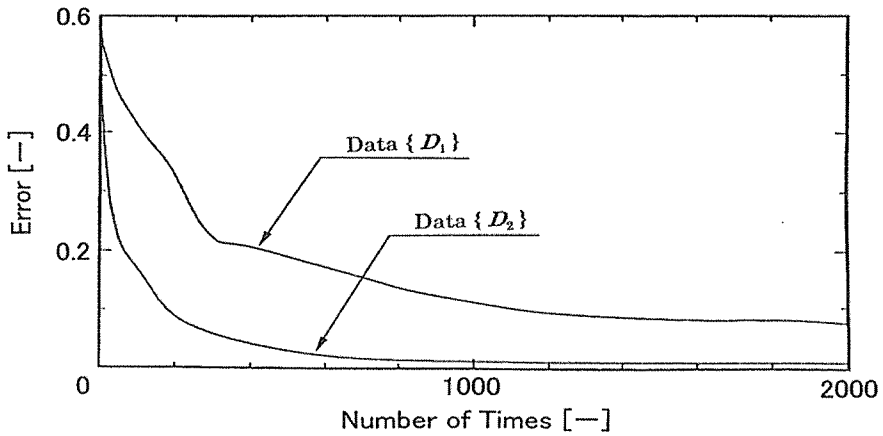


Fig. 6. Learning Process of Neural Network

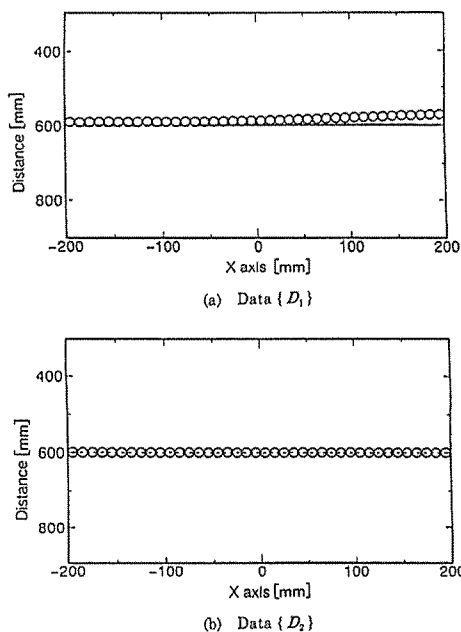


Fig. 7. Comparison of Data Structure for Network Training (Flat Surface)

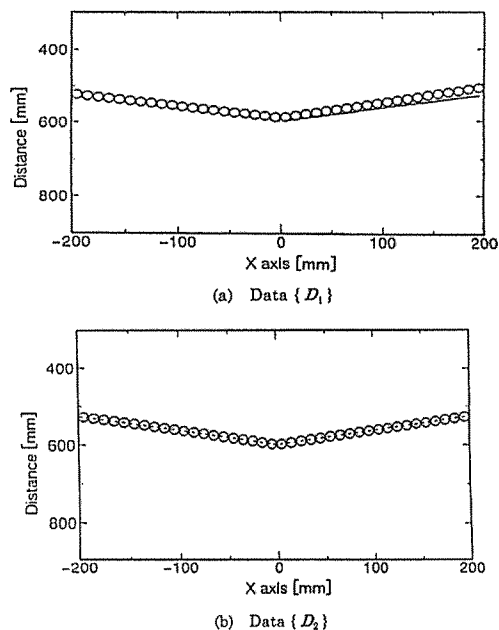


Fig. 8. Comparison of Data Structure for Network Training (Concave)

4 計測結果

前述 3. 2の結果に基づき、ネットワーク構造を160×120×80、入力データ構造としてデータ {D₂}を用いた。学習パターンは13種類、学習回数は3000回である。結果をFig. 9～Fig.12に示す。測定領域は貯槽中央よりx軸方向に±400mmの範囲で、貯槽のほぼ全域にあたる。Fig. 9は水平な面で全体にわたって実粉面を良好に再現している。Fig.10のように単傾斜面についても同様に良好な再生画像を得た。Fig.11は凹形の粉面で、粉体が貯槽の中央排出口より取り出された場合に形成される形状であるが、結果は良好である。Fig.12は中央に高い凸形で上部から流入される場合に対応するが、貯槽両端の壁面に近い部分での誤差が見られるものの全体としての再現性は良好である。端面での誤差は反射波のうちセンサに対し遠ざかるものの一部が再度壁面でセンサ側へ反射されたためと考えられる。

学習パターンに含まれない未学習の形状についても、学習後のネットワークに入力を与えて画像を推定した。この結果、水平面と一部の斜面については良好な結果が得られたが、多くの場合再現が困難な結果を得た。特に貯槽側壁による反射波の影響を受ける画像両端部での誤差が大きかった。一般に未知パターンに対して学習精度を向上させるためには学習時のパターン数を増やすことで改善をはかることができる。しかし学習データの増加に伴い必然的に学習を完了するまでの時間が増加するため必ずしも効果的方法とは言い難く、原データに含まれる誤差の要因を減少させる方法を探る必要があると思われる。

5 おわりに

超音波リニアアレイセンサを用いて貯槽内の上部粉面形状を計測するシステムについて実験的に検討した。得られた画像の反射位置と反射強度情報からなるデータを用いることによりニューラルネットワークの構造をコンパクト化し効率の良い学習をさせることにより虚像を除去した良好な再生画像を得ることができた。本報での再生画像は2次元画像であるが、発信器を中心としてリニアアレイを円周方向に配置することにより同様の原理で粉面の3次元形状計測を行うことが出来る。

参考文献

- 1) 松原弘保：配管と装置，26-8，49-54 (1986)。
- 2) 渡辺金之助：計測技術，15-2，70-77 (1987)。
- 3) 森元映治・糸井茂・早野延男：計測自動制御学会論文集，25-6，623-629 (1989)。
- 4) E. Morimoro, S. Itoi and N. Hayano : Proceedings of the 1st China-Japan International Symposium on Instrumentation, Measurement and Automatic Control, 60-65 (1989)。
- 5) E. Morimoro, S. Itoi and N. Hayano, Proceedings of the 4th Japan-Korean Joint Seminar on Powder Technology, 253-259 (1991). 6) E. Morimoto, N. Egawa, S. Itoi and : Tech. Rep. of Yamaguchi Univ., 4-5, 357-369 (1991)。
- 7) 白江公輔・水田万美子・千原国宏：システム制御情報学会誌，3-10，318-325 (1990)。

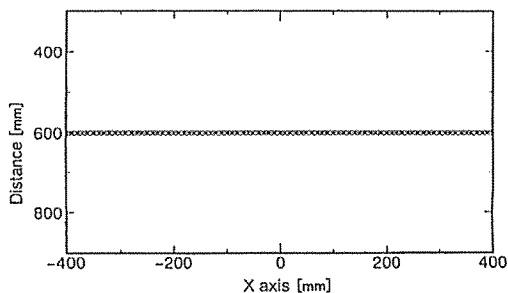


Fig. 9. Measurement Result for Flat Surface

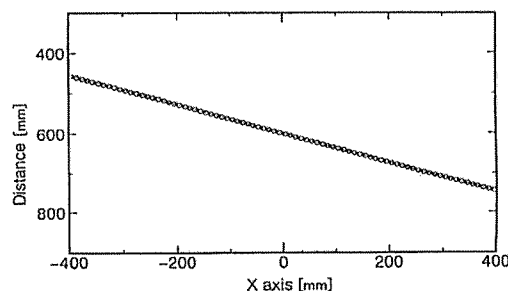


Fig. 10. Measurement Result for Slope

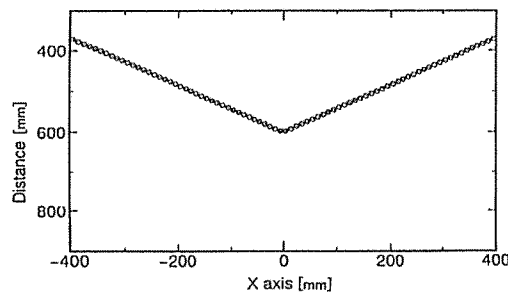


Fig. 11. Measurement Result for Concave

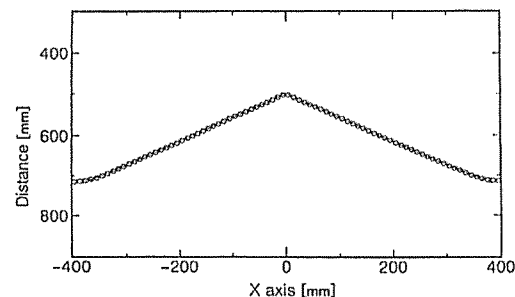


Fig. 12. Measurement Result for Convex

記号

D_1	: ニューラルネットワーク学習データ	n	: ネットワーク入力位置
D_2	: ニューラルネットワーク学習データ	P	: 計測格子点位置
$H(x_n)$: 計測粉面高さ	Ri	: i 番目受波センサ素子
$I(x_n)$: 計測粉面受信波強度	u	: ニューロン入力
N	: 水平方向分割数	x_n	: 粉面測定位置
		y	: ニューロン出力