超音波による形状認識系のための スケール・スペース・フィルタリングを用いた信号処理

非会員 土井滋貴 (奈良工業高等専門学校)
正員 高橋晴雄 (奈良工業高等専門学校)
非会員 松田 稔 (大阪電気通信大学)

Signal Processing using Scale-Space Filtering for Ultrasonic Shape Recognition System

S.Doi (Nara National College of Technology)

H.Takahashi, Member (Nara National College of Technology)

M.Matsuda (Osaka Electro-Communication University)

In a shape recognition, an object shape can be constructed by pasting some faces. The determination of the faces requires a precision distance measurement. In this paper, we suggest a distance measuring system combining ultrasonic sensors with the scale-space filtering. For the signal processing using the scale-space filtering, tracing the fingerprint calculated by the scale-space filtering is important. We present two tracing methods, one method is to use a rule-based system on feature parameters extracted from patterns of the fingerprint, and another method is to correct by a phase matching in addition to use the rule-based system. And also experiments of distance measuring for determination of the identical faces are discussed. The experimental results has shown that the distance measurement using the scale-space filtering has the advantage of precision.

キーワード：形状認識、超音波センサ、スケール・スペース・フィルタリング、信号処理

1. まえがき

アーム・ロボット等の手先に取り付け作業対象や作業状態を認識する図1に示すようなセンサ系を考える。この場合、対象物体の形状を認識する方法として、ある大きさを持つ面を対象物体の一部として決定し、その面を張り合わせて全体の形状を構成する方法が考えられる⁽⁸⁾。図2に示すように、対象となる物体の様子があらかじめ限定されている場合、超音波近接センサ等で一般的に行われる物体表面を点の集まりとして計測し全体像を認識する方法⁽¹⁾よりも効率よく認識が行われると考えられる。

本稿では、この場合の面の決定方法として超音波センサ系とスケール・スペース・フィルタリング⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾(以下SSF)を組み合わせる方法を提案する⁽⁹⁾。超音波センサを用いて面を決定するには、精度のよい距離の計測が要求される。超音波センサを用いた距離計測では、しきい値処理により受信信号のリーディング・エッジを捉える方法や、予想される受信信号との相互相関処理による方法などがあるが、しきい値や相互相関のための予想受信信号の決定において微妙な調整が必要になる⁽²⁾⁽³⁾。そこでこれらの問題点を解消する方法としてSSFを導入する。使用するセンサ系は、図3、4に示すように、超音波センサの送信素

図1 作業対象を認識するセンサ系

Fig.1. A sensor system for recognizing object.

図2 点と面を用いた形状の認識

Fig.2 Shape recognitions from points or faces.

図3 面の距離と傾きの決定(平行な場合)
Fig.3. Determination of distance and inclination
(parallel)

図4 面の距離と傾きの決定(傾きのある場合)
Fig.4. Determination of distance and inclination
(not parallel)

子1個に受信素子4個を組み合わせ、受信信号の時間差から面の距離と傾きを求める。各送信、受信素子は40kHzと200kHzを組み合わせ、各受信信号をSSFして得られた受信信号のフィンガープリントのパターンにより超音波の反射信号の到達時間を検出し、その値から距離を計算する。

2. 面の決定方法

〈2・1〉 面の距離と傾き 図3、図4に示すように、超音波センサの送信素子1個に受信素子4個を組み合わせ、送信素子から発せられた音響信号が受信素子に到達する時間及び時間差から面の距離と傾きが計算できる。図3では各受信信号の到達時間に差がないので、各受信センサに到

る伝送経路の距離が等しく、従って面は送信素子受信素子で構成されるセンサ系と平行であることが推定される。図4では水平方向の対の受信素子の受信信号に時間差が生じているので、面は傾いていることが推定される。

図5に示すように、送信素子sと受信素子rとの距離がb、送信素子sの中心軸上に距離a、傾きθで計測面が置かれていとする。音波が反射面で鏡面反射するとすると、見かけ上、送信素子から距離dだけ離れた点r'に受信素子が存在することになる。その距離dが実際の受信素子rまでの伝送距離となる。式1に示すように、送信素子sから虚受信素子r'までの経路を送信素子sの中心軸上の点x0を経由して合成すると、伝送距離dはa、b、θとの関数になる。逆に2ヶ所の受信点でのdがそれぞれがもとまればセンサ系と面との距離aと傾きθが逆算できる。更に、縦横ともに傾きが求まれば面が決定される。

決定される面の距離と傾きの精度は受信信号の到達時間の測定精度に依存する。一般的に到達時間の測定方法は、受信状態がよく、それほど精度が要求されない場合は単純なしきい値処理が、ある程度の精度が要求される場合には相関処理が用いられる。しかし、安定した精度を得るには、しきい値処理の場合しきい値の決定が、相関処理の場合相関をとる信号の選定が難しい。そこで、これらの点を改善しより精度を向上させるためにSSFを用いた処理の導入を試みる。

$$\begin{aligned} d &= ((a + c \cdot \cos(\theta' - \theta))^2 + (c \cdot \sin(\theta' - \theta))^2)^{1/2} \quad \dots\dots(1) \\ c &= (a^2 + b^2)^{1/2} \\ &= x0r = x0r' \\ \theta' &= \tan^{-1}(b/a) - \theta \end{aligned}$$

図5 面の傾きと伝送経路
Fig.5. Inclination of face and transmission path

〈2・2〉 スケール・スペース・フィルタリング SSFはガウシアン・スムージングを用いて信号をマルチ・スケールに拡張し、拡張された信号のゼロクロス点を求める信号処理法で、その求められたゼロクロス点の集合をフィンガープリントと呼ぶ。フィンガープリントの定義を式2に示す。フィンガープリントの形状は信号の特徴をよく表現していると言われていて、ノイズの影響や非線形歪みに対してもその特徴は保存される。今回のように到達時間の

測定に利用するには、SSFにより受信信号のフィンガープリントを求め、受信信号の到達点を示す、フィンガープリントの形状の変化する点を見つけだす処理を行う。

本稿での評価実験系では、判別しやすいフィンガープリントの形状を得るために、送信信号として 40kHzと200kHzを組み合わせた信号を使用する。図6にSSFで計算されるフィンガープリントの特徴一例として、40kHzと200kHzの合成信号において、振幅がそれぞれ5倍に変動した際のシミュレーション結果を示す。図6ではグラフ左から40kHzと200kHzの振幅が、1:1、0.2:1、1:0.2、0.2:0.2と変化しているにもかかわらず下段に示すフィンガプリントの形状の特徴は保たれていることがわかる。この特徴は反射面の反射減衰特性が周波数によりことなる場合等の補正に有効である。

F P:フィンガープリント(2)
 $\equiv \{(t, \sigma) \mid (t, \sigma) \in S, h(t, \sigma)=0\}$
S:スケール空間
 $= \{(t, \sigma) \mid 0 \leq t < \infty, 0 \leq \sigma < \infty\}$
 $h(t, \sigma)=d^2/dt^2(f(t)*g(t, \sigma))$
f(t) :時系列信号
g(t, σ): 1次元ガウス関数
* :コンボリューション積分

図6 合成信号の変動シミュレーション
Fig.6. Fluctuating simulation of synthesized wave

〈2・3〉 フィンガープリントのトレース SSFの利用にあたっては、フィンガープリントをいかにトレースするか、つまり、フィンガープリントからいかに情報を取り出すかが重要になる。これまでに筆者らはそのトレース方法として、フィンガープリントの形状の認識や形状の特徴量の判別にニューラルネットワーク及びファジィ推論の利用を試みてきた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。今回は、フィンガープリントから40kHz+200kHzのパターンを取り出す方法について、いくつかのトレース方法を定めるための予備実験処理をふまえて、いくつかのルールをもちいたルール・ベース的な手法を2種類用いる。

1つめの方法は40kHz+200kHzのパターンに注目し、その

図7 フィンガープリントのトレース例
Fig.7. An Example of tracing fingerprint

パターンを取り出す方法で、用いるルールは以下のような

- 1)特定スケール、特定区間でのゼロクロス点の数
- 2)特定スケール、特定区間でのゼロクロス点の間隔

の2種類の量に注目し、合計6つのルールより成る。図7にその注目量の変化およびルール成立の様子を示す。図7の2段目のグラフはフィンガープリントの中間部の一定区間内のゼロクロス点の数を表し、同じく3段目は基底部の数を表す。この数に対し40kHz+200kHzの信号が存在するルールとして、“25μsec.間にゼロクロス点が10個”を設定する。7段目のグラフの1、2段目がこのルールの成立状況を示す。図7の3、4、5段目のグラフはフィンガープリントの上部の一定区間での隣り合うゼロクロス点の間隔を表す。この数に対し40kHzの信号が存在するルールとして、“間隔10～15μsec.”を設定する。7段目のグラフの3、4、5段目がこのルールの成立状況を示す。もう1つ40kHz+200kHzの信号の存在を補助するルールとして、“一定区間で1μsec.間隔で隣り合うゼロクロス点がない”を設定する。7段目のグラフの6段目がこのルールの成立状況を示す。これらの6つのルールがすべて成立する場合、40kHz+200kHzの受信信号が存在するとする。8段目のグラフがすべてのルールの成立を示す。

これらのルールを満たす点、つまりフィンガープリントが40kHz+200kHzを表す規則的なパターンに変化する点の時刻が受信信号の最初の到達時刻である。送信音の発生時刻から、最初の到達時刻までの時間が到達時間となり音速を掛ければ距離が求まる。

この方法ではセンサの過渡応答等によって生じる反射信号の先端部のパターンの乱れにより時刻の判定に誤差が生じる。そこで、もう1つの方法として前述の方法で求められた40kHz+200kHzのパターンの先頭から一定時間(150μsec.)経過した後の40kHzの位相情報、つまりゼロクロスの位置をフィンガープリントより調べ、その位置により40kHz+200kHzのパタンから計算される到達点を補正する方法をもう1つの方法として用いる。この補正により時刻の精度は40kHzの信号の位相の精度まで向上する。

図11 平行面の距離の計測(しきい値処理)
Fig. 11. Distance measurement of face in parallel
(thresholding)

図12 平行面の距離の計測(相互相関処理)
Fig. 12. Distance measurement of face in parallel
(cross-correlation)

図13 平行面の距離の計測(S S F 処理:補正なし)
Fig. 13. Distance measurement of face in parallel
(scale-space filtering:without correction)

図14 平行面の距離の計測(S S F 処理:補正あり)
Fig. 14. Distance measurement of face in parallel
(scale-space filtering:with correction)

図15 平行面の距離の計測(平均値)
Fig. 15. Distance measurement of face in parallel
(averaging)

〈3・4〉 傾斜面の距離計測実験 次に、送信素子の中心軸上でのセンサ系と面との距離は一定にしておき、その軸上の点を中心に面を傾けた場合の伝送距離の測定結果を示す。面までの距離 145mm、送信素子－受信素子間の距離 46mm、面の傾きは+10から-10度まで 2度刻みで各角度について18回計測を行う。計測結果は送信素子を中心に対称に置かれた2系統受信素子からの受信信号による結果を図16、17、18、19に、18回の計測の平均をとった値を図20、21に示す。

反射面の傾きが変化すると反射波の形状、特に包絡の形状が変化するため、しきい値処理、相関処理では理論的に計算される伝送経路の距離と異なる値となっている。なかでも相関処理を用いた結果のばらつきが大きい。本稿では議論しないが、この傾向は異なる包絡の形状をもつ仮想受信信号を用いても同じような傾向を示す。相関処理の場合

図16 傾斜面の距離の計測(しきい値処理)
Fig.16. Distance measurement of face in inclination (thresholding)

図17 傾斜面の距離の計測(相互相関処理)
Fig.17. Distance measurement of face in inclination (cross-correlation)

図18 傾斜面の距離の計測(S S F 処理:補正なし)
Fig.18. Distance measurement of face in inclination (scale-space filtering:without correction)

図19 傾斜面の距離の計測(S S F 処理:補正あり)
Fig.19. Distance measurement of face in inclination (scale-space filtering:with correction)

図20 傾斜面の距離の計測1(平均値)
Fig.20. Distance measurement of face in inclination 1 (averaging)

図21 傾斜面の距離の計測2(平均値)
Fig.21. Distance measurement of face in inclination 2 (averaging)

は受信信号の先端を見つけだすよりも信号の包絡の中心を見つけることになる。従って、包絡の形状の変化によって、包絡の最大値をとる時刻が変化すると、それがそのまま誤差となって現れると考えられる。

2つの S S F 処理を比べると、平行面の実験と同様に、位相情報により補正を行う方法が結果のばらつきが少ない。しかし、平均をとってみると補正を行わない方法、行う方法の差はあまりない。また理論値に対し絶対誤差が生じて

いるが、平行面の距離計測実験と同様に基準距離を用いて校正を行うことで絶対誤差は軽減可能である。

4. まとめ

面を使った形状認識系のための、面の決定方法として複数の超音波センサとSSFを組み合わせた方法を提案した。面を決定するための基礎実験としてSSFを利用した距離の算出方法を検討し、評価実験を行った。2種類のトレース方法を用いた実験結果から、SSFを用いた受信信号の処理方法は、

- 1)しきい値処理、相関処理等の従来の方法よりも受信信号の変化による影響を受けにくい。
- 2)受信波のパターンを見つけたす処理のみでは結果のばらつきは少なくはないがその性質は良質である。
- 3)受信波のパターンと定常状態での位相情報を利用する方法は従来の方法と比べてより精度が得られる。

などの特徴がわかった。これらの特徴からSSFを用いた距離算出方法は従来の方法よりも精度と受信信号の変化に対して優位性のあることが明らかとなった。

また、SSFを用いた処理方法で行った処理手順は複数の帯域フィルタとゼロクロス検出とを組み合わせた代替処理で行うことも可能である。しかし、SSFを用いることで生じる重要な優位点は、SSFで計算される信号のフィンガープリントを利用することにより、様々な信号の特徴抽出がフィンガープリント上での幾何的な処理で一元的に行えることにある。

文献

- (1)T.Tsujimura T.Yabuta and T.Morimitu: "Shape-Reconstruction System for Three-Dimensional Objects Using an Ultrasonic distance sensor mounted on a manipulator", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 111, JUNE, pp. 180-186, 1989
- (2)中嶋:"ロボットによる経路ならい作業のための超音波近接センサ", 計測自動制御学会論文集, vol. 22, no. 5, pp. 71-77, 1986.
- (3)永島, 大矢, 油田:"移動ロボットのための壁面計測用超音波センサ", 日本音響学会誌, vol. 51, no. 1, pp. 39-42, 1995
- (4)D.Marr and E.Hildreth: "Theory of Edge Detection", Proc. Roy. Soc. London, vol. B 207, pp. 187-217, 1980.
- (5)A.L.Yuille and T.A.Poggio: "Scaling Theorems for Zero Crossings", IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol. PAMI-8, no. 1, pp. 15-25, 1986.
- (6)J.Babaud, A.P.Witkin, M.Baudin and R.O.Duda: "Uniqueness of the Gaussian Kernel for Scale-Space Filtering", IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol. PAMI-8, no. 1, pp. 26-33, 1986.
- (7)廣嶋, 松田:"3次元形状入力システムにおけるスキャンノイズの効率化", 平成4年電気関係学会関西支部連合大会, G2-44

(8)土井, 松田:"超音波センサとスケール・スペース・フィルタリングを用いた物体の形状認識方法", 平成6年電気関係学会関西支部連合大会, G2-25

(9)土井, 他:"超音波センサとスケール・スペース・フィルタリングを用いた距離計測系", 平成7年電気学会全国大会, 610

(10)土井, 他:"マルチスケール表現を用いた信号処理", 第2回SSCシンポジウム, システム制御情報学会, 1989

(11)土井, 他:"フジィを用いた信号処理", 第3回SSCシンポジウム, システム制御情報学会, 1990

(12)土井, 他:"水中情報伝送におけるスケール・スペース・フィルタリングに関する一考察", 海洋音響研究会誌, vol. 15, no. 1, pp. 38-45, 1987

(13)土井:"マルチスケール表現を用いた信号処理の研究", 奈良高専研究紀要, 第24号, pp. 33-36, 1988

(14)土井:"マルチスケール記述を用いた信号処理の研究その2", 奈良高専研究紀要, 第25号, pp. 35-39, 1989

土井 滋貴 (非会員) 1959年11月5日生。1984年大阪電気通信大学工学部電子工学科卒業、1988年大阪市立大学大学院工学研究科前期博士課程修了。現在、奈良工業高等専門学校講師。音響信号、生体信号などの信号処理とその応用の研究に従事。日本音響学会会員。

高橋 晴雄 (正員) 1940年2月22日生。1966年大阪市立大学大学院工学研究科修士課程修了。1967年奈良工業高等専門学校講師、1973年同助教授、1986年同教授。1985～1986年米国プリンストン大学客員研究員。1991～1992年JICA(国際協力事業団)長期専門家としてインドネシアの電子工学教育の指導。電子情報通信学会会員、システム制御情報学会会員。工博。

松田 稔 (非会員) 1965年同志社大学工学部電気工学科卒業。1970年同大学院工学研究科博士(後期)課程修了。英国Warwick大学客員教授などを経て、現在、大阪電気通信大学工学部電子工学科教授。水中音響、感性情報、並列処理などの研究に従事。日本音響学会、システム制御情報学会、海洋音響学会、などの正員。工博。

(平成7年1月30日受付、同7年5月22日再受付)