

Realization of contact surface geometry by dragging a whisker-type tactile sensor across measuring objects

著者	Yamashita Yorihiro, Tachiya Hiroshi, Tsukamoto Takashi
journal or publication title	Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C
volume	73
number	6
page range	1786-1793
year	2007-06-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/7045

ウィスカ形触覚センサを用いたなぞり動作による接触面形状の呈示

山下 順 広^{*1}, 立 矢 宏^{*1}, 塚 本 卓^{*2}

Realization of Contact Surface Geometry by Dragging a Whisker-type Tactile Sensor across Measuring Objects

Yorihiro YAMASHITA, Hiroshi TACHIYA^{*3} and Takashi TSUKAMOTO

^{*3}Kanazawa University Graduate School of Natural Science & Technology, Kakuma-machi, Kanazawa city, Ishikawa, Japan

Previously we reported a method of displaying the shape of an object by using an array of whisker sensors. The array of whiskers was pressed against the object to be measured and the deflection of each whisker was measured. The measurements were used as inputs to a neural network to recognize the shapes. However, the previous method needed a larger number of whiskers to recognize the wider surface, because the array of whiskers has to be in full contact with the entire surface. Therefore, this study presents a new method in which a much smaller number of whiskers are dragged across the surface of the measured object to distinguish the shapes. The method is performed in the following manner. Firstly, a smaller number of whiskers are dragged across an object and each whisker deflection direction is distinguished at discrete time intervals. Next, the neural network continuously monitors the output from the whiskers and produces a result that characterizes the surface at the current scan position. Lastly, by building up a map of the classification of the entire surface, the geometry of the measured object can be displayed. This study exhibits the hardware and software required for displaying shapes, and shows examples of the results obtained from the measurements of some objects.

Key Words : Tactile Sensor, Whisker, Contact Surface, Display, Shape Measurement, Recognition, Neural Network

1. 緒 言

ロボットが周囲の物体の形状を把握するために用いるセンサとしては視覚センサが代表的である。しかし、視覚センサは、暗闇や遮蔽物の陰に在る物体の認識、透明な物体の認識などが困難であり、このような場合には触覚センサの利用が期待される。そこで、著者らは先に複数のウィスカからなる触覚センサを提案し、ウィスカのたわみ方向から対象物の種類などを認識⁽¹⁾⁽²⁾、また、表面形状を呈示⁽³⁾する方法を示した。しかし、これまでに提案したセンサおよび認識方法は、表面形状の大きさに応じた本数のウィスカを必要とし、また、ウィスカの配置間隔以下の形状は認識できず、さらに、センサを押しつけた際にウィスカがランダムな方向へたわむ平面の認識が行えなかった。

そこで、本論文では複数のウィスカを対象物に接触させながら移動させ、その時に生じるウィスカのたわみ方向を逐次検知して表面形状の認識を行う方法を検討する。このようななぞり動作による認識としては、金子らが1本のウィスカで対象物をなぞり、その形状を精度よく測定する方法⁽⁴⁾⁽⁵⁾を示している。本論文で検討する方法は、複数のウィスカによる表面形状の認識結果

より、その形状の特徴を視覚センサによる画像処理と同様に広範囲にわたり呈示することを目的としており、高精度な形状測定などには適さないが、ロボットなどが視覚センサを使用できない状況下で周囲の物体を簡便に見分けるためなどに有用である。

本論文では、ウィスカを用いた対象物のなぞり動作の方法、ウィスカのたわみ方向からの表面形状の認識・呈示方法を述べ、少数のウィスカからなる触覚センサで広範囲にわたり接触面形状が呈示可能であることを示す。

2. ウィスカ形触覚センサの概要

2-1 ウィスカ素子とたわみ方向の認識 提案している触覚センサは正形状のフレームに固定したベースに1本のウィスカを取り付けた図1に示すウィスカ素子と呼ぶ部品を複数配置して構成する。ウィスカには直径0.5mmの超弾性Ni-Ti合金[ニラコ製:品番947385]を用い、先端には対象物の損傷を防ぐため直径4mmのプラスチック製の球を取り付けている。

ベースはヒステリシスが比較的小さい合成ゴム[アズワン社製クロロプレンゴムシート:品番6-1020-01]からなり、その裏面には図1(b)に示すように単軸形のひずみゲージ[東京測器:FLG-02-11]を互いに直交するように2枚貼付している。ウィスカの変形によってベースに

*原稿受付

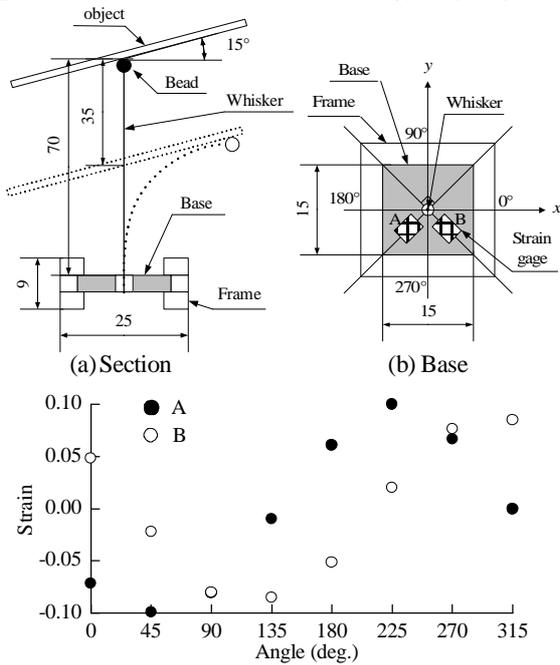
^{*1} 正員, 金沢大学大学院自然科学研究科 (〒920-8667 金沢市角間町)

^{*2} 金沢大学大学院自然科学研究科

E-mail:tachiya@t.kanazawa-u.ac.jp

はひずみが生じ、その大きさをひずみゲージで検知してウィスカのたわみ方向を識別する。なお、ベースに生じるひずみよりウィスカのたわみ方向を解析的に求めることは困難である。そこで、ニューラルネットワーク[以下、NNと記す]を用い複数方向に分割し定義したたわみ方向を識別する。

NNで識別するたわみ方向は、図1(b)に示すウィスカの取り付け位置を原点とし設定したxy座標を用い、図2に示すようにウィスカのベース面への投影を含む8つの方向とする。例えばウィスカの投影が図2に示すように2と記した範囲に含まれる場合、たわみ方向を2とする。また、ウィスカが対象物と接触せず、たわまない状態をたわみ方向が9であるとして同様に識別する。参



(c) Measured strain at the base with the deflection angle
Fig. 1 Whisker element (unit: mm)

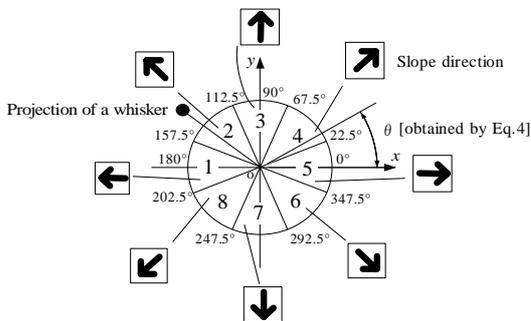


Fig. 2 Deflection directions of the whisker and slope direction

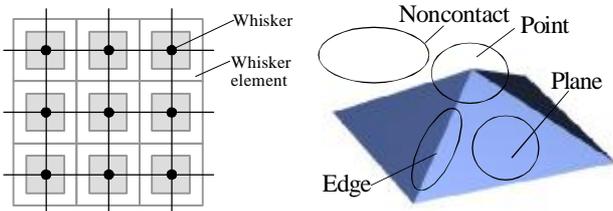


Fig. 3 Previous tactile sensor

Fig. 4 Element shapes

考として、図1(a)に破線で示すように、ウィスカの先端から鉛直方向下向きへ35mmの位置まで15° 傾斜させた平板を接触させてウィスカを各方向へたわませ、ベースに生じるひずみを測定した。図1(c)に、図1(b)に示すx軸から左回り45° おきの各方向へウィスカをそれぞれ上述の通りたわませ得られた、図1(b)のAおよびBの位置のひずみを、引張を正として示した。図1(c)より、ひずみはたわみ方向に対して周期的に変化する。

NN構築のための学習データは、ウィスカを各方向にたわませたときに生じるひずみを入力、たわみ方向を教師信号として作成する⁽⁴⁾。NNには階層構造モデルを用い、学習方法は教師あり学習とし学習アルゴリズムには逆誤差伝搬法⁽⁶⁾を用いる。なお、ウィスカと対象物との接触は以下の条件を満たすとする。

- 条件1: ウィスカの軸方向の伸縮はウィスカのたわみ変形に対し十分小さい。
- 条件2: 対象物はウィスカに比べ十分硬い。
- 条件3: ウィスカのベース面への投影はほぼ直線となる。
- 条件4: ウィスカは対象物表面にそって滑らかにたわむ。

以上で述べたウィスカのたわみ方向を認識するNNをたわみ方向認識NNと呼ぶ。なお、NNの構築は製作したウィスカ素子ごとに行う。

2-2 従来のセンサの構成と認識方法

前報⁽³⁾では図3に示すように複数のウィスカ素子を平面上に縦横に配置して触覚センサを構成した。同センサをベース面法線方向にそって図4に示すような突起物の上方から接触させ、各ウィスカのたわみ方向をNNによって識別し、隣接する複数のウィスカのたわみ方向の組合せから、それらのウィスカで囲まれた領域に接触している形状をNNで認識した。さらに、複数の領域での認識結果を基に接触形状を呈示した。

しかし、緒言で述べたように以上の方法では触覚センサを対象物表面全体に接触させるため、ウィスカの配置面を対象物より大きくする必要がある。また、ウィスカの配置間隔以下の局所的な形状は認識できない。したがって、広い範囲または細部の形状を認識するにはウィスカを多数用い、また、密に配置する必要がある。

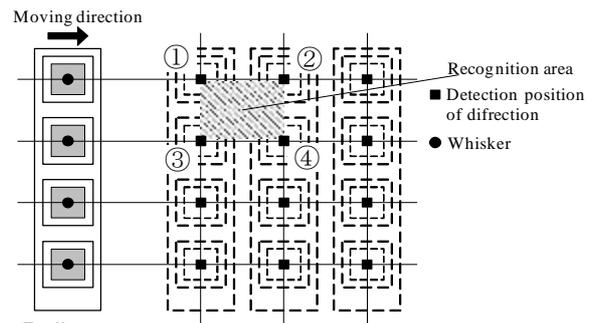


Fig. 5 Outline of recognition method by dragging the sensor

る. さらにセンサがベースに平行な面に接触する場合, ウィスカがランダムに変形するため平面の認識が行えなかった.

3. 表面形状の認識および呈示方法

3-1 なぞり動作による表面形状の検知 提案する

方法では, 図5に示すような一列に配置したウィスカで対象物表面をなぞり, 一定間隔ごとにウィスカのたわみ方向を検知する. 同方法によれば図3に示した従来の触覚センサによる認識と同じく, 接触表面上を格子状に分割した各交点位置におけるウィスカのたわみ方向を検知できるとともに, その範囲はウィスカの本数によらずなぞり動作によって掃引した領域となる. また, 従来の方法と異なりセンサのベースに平行な平面との接触においても, ウィスカは面に沿う方向へたわむため認識が可能である. さらに, たわみ方向の検知間隔を調整することで, 対象物表面に存在する, ウィスカの配置間隔より小さな形状の認識も可能となる.

3-2 要素形状とその認識 認識し呈示する形状は

前報と同じく物体の特徴を表す形状として画像処理においても重視される平面, エッジ, 頂点とする⁹⁾. なお, 図4に示す通り平面は平板, 角柱等の平らな面を, エッジは角柱, 四角錐等の稜線を, 頂点は角錐の尖点である複数の稜線の交点や球面等の頂点を想定している. 本論文では, 以上の3つの形状に加え非接触を呈示する. これら4種類の形状を要素形状と呼ぶ.

以上の要素形状の認識は図5に示すように一列に配置した2本以上のウィスカで対象物表面をなぞり, ある間隔で検知した隣接しあう4点①~④でのウィスカのたわみ方向を用い, 同点で囲まれた四角形状の領域ごとに行う. 以下, 同領域を認識領域, また, ウィスカのたわみ方向を検知する位置をたわみ検知位置と記す.

なお, ウィスカのたわみ方向は, なぞる速度や接触面の摩擦等によりばらつきが生じやすく, その組合せも多数存在することから, 要素形状の認識は前報⁹⁾と同じく認識領域を構成するウィスカのたわみ方向の組合せを入力, 要素形状の種類等を出力とするNNで行う. 同NNを要素形状認識NNと呼ぶ. 要素形状認識NNの構築に用いる学習データは, NNを短時間で簡便に構築するため, なぞり動作を行った場合に生じる各ウィスカのたわみ方向を予測し計算機上で作成する^{(1)~(3)}.

まず, ウィスカ先端と接触物間との摩擦が小さく無視できるとした場合の学習データの作成について述べる. 認識の対象とする各要素形状を触覚センサでなぞった場合の接触例を, 予想されるウィスカのたわみ方向とともに図6に示す. 図6(a)~(c)において左図および中央図は対象物とウィスカの接触状態を示してお

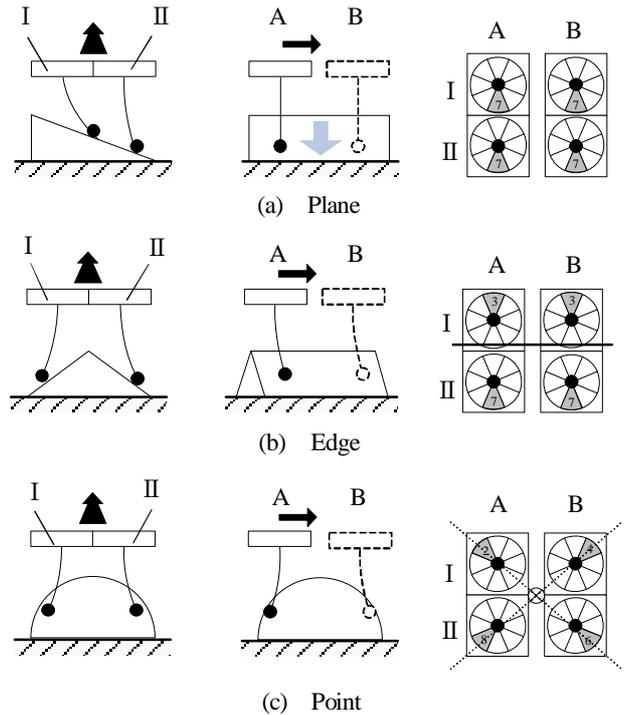


Fig. 6 Deflection directions of the whiskers for each shape

り, 右図はたわみ方向の認識結果を示す. なお, 各ウィスカのたわみ方向は同図中に記した番号の方向とする.

対象物表面の摩擦が無視できる場合, 各ウィスカは前報まで^{(1)~(3)}と同じく対象物の面に沿ってたわむとしてたわみ方向を予測する. そこで, 学習データの作成は前報⁹⁾と同様とし, その概略のみを以下に述べる.

図6(a)の左および中央図に示すように, ウィスカが平らな面上をなぞる場合, 同箇所を平面と認識させる. このとき, 各ウィスカは全て同一方向にたわむ. したがって, 図6(a)の右図に示すように, 隣り合うウィスカ I, II のたわみ方向が等しく, 連続したたわみ検知位置 A, B において, その方向が変化しない組合せを平面の学習データとする. このようなたわみ方向の組合せをウィスカがたわみ方向 1~8 に対して変形する場合を考え, 8通りの組合せを作成し学習データとする. また, これらウィスカのたわみ方向は, 摩擦などの影響がない場合, 平面の法線を触覚センサベース面に投影した方向に一致する. 後述の表面形状の呈示時に同方向を示せば, 形状の特徴をより詳細に表せる. そこで, 要素形状が平面として認識される場合, NNにはウィスカのたわみ方向を平面の方向として同時に出力させる.

図6(b)の左および中央図に示すように2本のウィスカが角柱などの稜線をまたいで, ほぼ平行になぞった場合, 同部分をエッジとして認識させる. このとき, ウィスカは稜線を境に2分した方向にたわみ, その方向は図6(b)の右図に示す1通りである. よって, 隣り合うウィスカ I, II のたわみ方向が稜線に対称な方向にたわみ, 連続したたわみ検知位置 A, B でウィスカのたわ

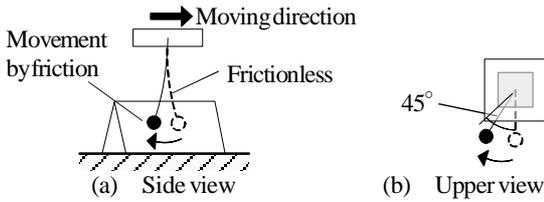


Fig. 7 Deflection behavior of the whiskers due to friction

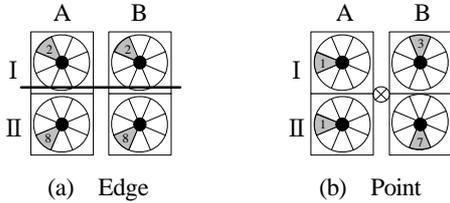


Fig. 8 Deflection directions of the whiskers due to friction

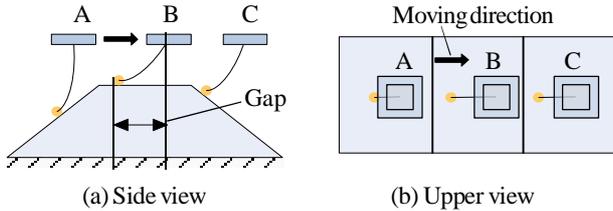


Fig. 9 Deflection behavior of the whisker touching an object

み方向に変化のない場合をエッジの学習データとする。

ウィスカが図6(c)の左および中央図に示すように球等の頂点付近をなぞった場合、同部分を頂点として認識させる。このとき、各たわみ検知位置でウィスカは、図6(c)の右図に示すように球の中心位置とウィスカの位置を結ぶ直線にそってたわむ。なお、同図中の⊗は球の中心を示す。このように、頂点の学習データには認識領域を構成するウィスカがその領域の中心から放射状にたわむ場合の組合せを用いる。

次に、ウィスカ先端と接触物間との摩擦が無視できない場合の学習データについて述べる。前報⁹⁾のように触覚センサを対象物の上方から接触させた場合、ウィスカはほぼ接触面に沿って変形する。しかし、ウィスカで対象物をなぞる場合、摩擦の影響によりウィスカは図7(a)に示すように、なぞり方向と反対側へたわむことが予想される。このような摩擦によるたわみ変形の角度が本論文では図7(b)に示すように45°以内である場合を対象として学習データを以下のように加える。

エッジとの接触において図6(b)を例に摩擦による影響を考慮した学習データを検討する。なお、なぞる方向は図6(b)の中央図に矢印で示す通りとする。ウィスカが摩擦が無視できる場合のたわみ方向から45°以内で、なぞり方向と反対側にたわむとすれば、たわみ方向は図6(b)に対して図8(a)に示す状態となる場合が予想される。また、頂点との接触において同様に検討すれば、ウィスカのたわみ方向は図6(c)に示す例に対しては図8(b)となる。さらに、学習データとしては図6(b)および(c)に示した例に対し、なぞり方向を逆方向とした場合

Table 1 Training data for NN to recognize the element shapes

Element shape	Position of whiskers				Output number
	①	②	③	④	
Plane	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2
	3	3	3	3	3
	4	4	4	4	4
	5	5	5	5	5
	6	6	6	6	6
	7	7	7	7	7
	8	8	8	8	8
Edge	2	2	8	8	9
	3	3	7	7	10
	4	4	6	6	11
Point	1	3	1	7	12
	2	4	8	6	13
	3	5	7	5	14

も考え、それぞれ2通りのデータを加える。ただし、接触面が平面である場合は、各ウィスカのたわみ方向が摩擦によってなぞり方向と反対側にたわんだ場合であっても、先述の8通りの学習データのいずれかとなるため、摩擦の影響を考慮したデータは加えない。

以上で述べた各要素形状に対するウィスカのたわみ方向の組合せより要素形状識別の学習データを作成しNNを構築する。認識領域の各ウィスカの位置を図5に示す①～④として作成したNNの学習データを表1に示す。なお、NNの入力は、たわみ方向が図2に示すように1～8へ変化し、さらに1へと循環することを考慮した次式により得られる一対の値 (x_i, y_i) を用いる。

$$(x_i, y_i) = \left(\cos \frac{P}{4}(5-i), \sin \frac{P}{4}(5-i) \right) \dots \dots (1)$$

$i(=1 \sim 8)$ はたわみ方向を示す。なお、 i が非接触である9の場合は以下の値を用いる。

$$(x_i, y_i) = (0, 0) \dots \dots (2)$$

したがって、構築するNNの入力は4箇所のウィスカのたわみ方向を式(1), (2)によりそれぞれ変換した値であり入力ユニット数は8となる。また出力は表1に示す1～14の番号であり、それぞれ同表左欄の要素形状を表す。隠れユニット数は認識精度の向上と学習に要する時間の増加を検討し20とする。

構築したNNによる要素形状の認識の流れは次の通りである。まず、対象物をなぞり、各たわみ検知位置においてウィスカのたわみ方向をたわみ方向認識NNより得る。次に、認識領域を構成する4箇所のウィスカのたわみ方向に非接触となるウィスカが1つ以上存在する場合、同領域は対象物に十分接触していないとしてNNを用いず非接触と識別する。非接触でなければ、要素形状認識NNを用いて、平面、エッジ、頂点を識別する。

3.3 なぞり動作の方法 前節で述べた要素形状の認識方法では、角柱をなぞる場合に2本のウィスカが稜

線をまたいでいない時、角柱の平面部分のみが認識されエッジは認識されない。また、図9のBの位置のように触覚センサベース面と接触平面が平行である場合や、AおよびCの位置のようにベース面へ投影される接触平面の法線方向がなぞり方向と平行である場合、ウィスカのたわみ方向は常になぞり動作の反対方向となり、前節で述べたNNから出力されるウィスカのたわみ方向から平面の方向を把握することはできない。

以上のように一方向からのなぞりでは表面形状が正確に認識できない場合がある。そこで、なぞり動作は複数の異なる方向で行う。なお、なぞり動作を多数回とすればより詳細に形状が呈示可能になると予想されるが、本論文では最も単純な場合として対象物の表面上を以下に述べるように互いに直交する2つの経路それぞれで往復してなぞる場合を検討する。また、直交する2つの経路のなぞりによって、同一部分で直交するエッジがそれぞれ認識されれば、同箇所は稜線が交わる頂点であると推定できる。そこで、要素形状であるエッジに関して1経路目のなぞりで認識される場合をエッジ1、さらに、直交する2経路目のなぞりで認識される場合をエッジ2として区別し、同一箇所での両エッジの認識結果から呈示する要素形状を後述のように決定する。

なお、直交した経路をなぞるために触覚センサを90度回転させることになるが、ウィスカのたわみ方向は対象物に対して常に同一方向となるように表す。

3.4 呈示領域と呈示形状の決定 対象物の表面を複数回異なる方向でなぞる場合、各なぞり動作に対する前述の認識領域の位置はそれぞれ異なる。そこで、対象物の表面形状の呈示は重なり合う複数の認識領域の結果を基に、認識領域とは別に設けた格子状の領域で行う。同領域を呈示領域と呼ぶ。なお、なぞり動作による表面形状の認識においては、認識領域の座標を決定するたわみ検知位置とウィスカ先端と対象物表面との接触位置が図9のBの位置で示すように異なる。したがって複数方向のなぞり動作の認識結果を用いる場合には、このようなたわみ検知位置と実際の接触位置との差を補正する必要がある。本論文では測定結果を基に、たわみ検知位置と接触位置との差を20mmとして補正した。ただし、位置の補正を行う要素形状は平面、エッジであり、頂点および非接触は検知位置のずれが生じないため補正しない。このような、たわみ検知位置と実際の接触位置との補正は重要な課題であり、ひずみゲージの値からウィスカのたわみ量を推定し補正を行う方法などが考えられ今後の課題とする。

本論文で用いる呈示形状の決定方法は以下の通りである。まず、対象物の表面を互いに直交する2つの経路

で往復してなぞり、それぞれのなぞり方向で3.2で述べた通り認識領域に接した要素形状を識別する。要素形状の種類は平面、頂点、非接触およびエッジを直交するなぞり方向ごとに分けたエッジ1とエッジ2の5つとする。次に、対象物表面に対して設定した各呈示領域において、同領域に一部分または全体が重なる複数の認識領域に注目し、呈示領域と重なるいずれかの認識領域においてエッジ1およびエッジ2の両方が要素形状として識別されていた場合、これらの認識領域の識別結果を頂点に変更する。エッジ1またはエッジ2の一方のみが認識されている場合は識別結果をエッジに変更する。

次に、以上の結果を基に呈示領域で表す形状、すなわち、呈示形状を決定する。呈示形状の決定では、まず、呈示領域に重なる各認識領域の面積を求め、その面積を各認識領域で識別した要素形状の面積とする。ついで、直交する2経路それぞれの往復である計4方向のなぞり動作で得た全ての認識結果より、それぞれの要素形状ごとに面積の総和を求め、最も大きな面積となる要素形状を呈示する。面積が最大となる要素形状が複数存在する場合は、前報⁽⁹⁾と同じく接触領域が小さい頂点、エッジ、平面の順に優先して呈示し、認識される領域が比較的小さな形状が呈示されないことを防ぐ。また、非接触が最大面積となった場合は、平面、エッジ、

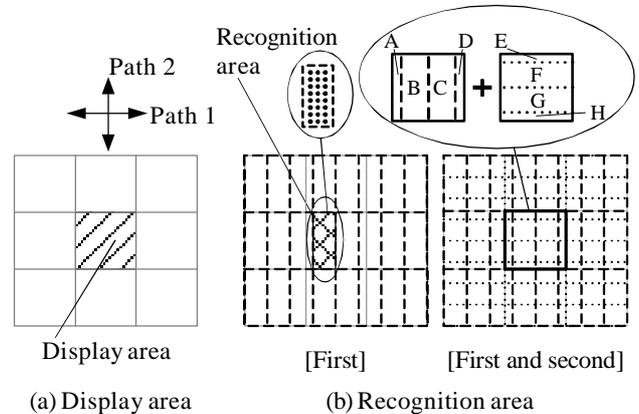


Fig. 10 Display area and recognition area

Table 2 Occupied areas of the recognized element shapes

Recognition area	Occupied areas of the recognized element shapes				
	Plane	Edge1	Edge2	Point	Noncontact
A	8				
B	24				
C		24			
D		8			
E			8		
F			24		
G	24				
H	8				
Total	64	32	32	0	0

Table 3 Total occupied area of each element shape

Total area	Element shape			
	Plane	Edge	Point	Noncontact
64	0	64	0	

頂点を優先し呈示することで、端部付近などにおいて対象物の特徴が呈示されないことを防ぐ³⁾。

呈示形状の決定の例を図10で示す。呈示領域を図10(a)に示すように格子状に設定する。同領域上を触覚センサで図10(a)中に示す経路1にそって往復した場合の認識領域の例を図10(b)の左図に示す。認識領域は破線で囲まれた四角形状の領域である。なお、往路および復路におけるたわみ検知位置および認識領域の位置は同一とする。また、図10(a)中に示す経路1に直交する経路2にそったなぞりによる認識領域を点線で表し図10(b)の右図に重ねて示す。図10(b)の右図で中央の呈示領域に注目すれば、同領域には8つの認識領域A~Hが重なっている。本論文ではこれらの領域の面積を図10(b)左図中の拡大図に示すように領域内の縦横方向に等間隔で分布する点を想定し、同点の数で表す。図10の例では、各認識領域に24個の点を配置している。

図10の例において各要素形状ごとに面積を求めた結果を表2とする。表2よりエッジ1およびエッジ2が検出されており、これらを頂点に変更する。その結果、各要素形状の面積の和は表3に示す値となる。表3で面積が最大となる要素形状は平面および頂点であるが先述の優先順位を考慮してここでは頂点を呈示する。

以上述べた各呈示領域で表す要素形状の決定において平面が選択された場合、さらにその方向を同時に呈示する。平面の方向はその面に接触するウイスカのたわみ方向から決定するが、図9に示したようになぞり動作の方向とウイスカのたわみ方向が平行である場合、平面の方向は正確に表せない。そこで平面の方向は、なぞり動作とたわみ方向が平行な場合は零、それ以外はウイスカのたわみ方向1~8で表す。

なお、一つの呈示領域に重なる複数の認識領域で識別される平面の方向は摩擦などの影響により必ずしも同じにならない。そこで、呈示する平面の方向は、各認識領域で識別した平面の方向の平均として次式で算出し、図2に示すx軸となす角度 θ として求める。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sin \frac{p_i}{4} (5 - p_i)}{\sum_{i=1}^n \cos \frac{p_i}{4} (5 - p_i)} \right) \cdot \dots \cdot \dots \cdot (3)$$

n は、ある呈示領域に重なる接触形状を平面と識別した認識領域の数、 p_i は各認識領域での平面の方向である。式(3)によりウイスカのたわみ方向が図7に示すように摩擦による影響を受ける場合も、往路および復路のたわみ方向の平均を用いることで平面の方向を識別できる。なお、表面形状の呈示では式(3)で得た θ より平面

の方向をたわみ方向と同じく図2に示す8方向で表す。例えば θ が図2中に示す値となった場合、平面の方向を4とする。

4. 呈示実験

4.1 認識および呈示プログラム ウィスカ形触覚センサを用いたなぞり動作による検知結果から接触面形状を呈示するプログラムをMicrosoft Visual Basic6.0を用いて作成した。その概要は以下の通りである。まず、触覚センサを対象物に接触させながらある一方向になぞり、たわみ検知位置ごとに各ウイスカのひずみゲージの値を読み込む(Step1)。次に、同値からたわみ方向認識NNを用いウイスカのたわみ方向を認識する(Step2)。次に、3.2で述べた通りウイスカのたわみ方向から各認識領域において要素形状を認識する(Step3)。以上のStep1~3の処理を直交する2経路それぞれの往復である計4方向において行う。次に、3.3で述べた通り複数回のなぞり動作で認識された要素形状の結果から呈示領域で示す要素形状を決定する(Step4)。さらに、各呈示領域で決定した要素形状を示すことで対象物全体の形状を呈示する(Step5)。

4.2 実験 対象物の形状認識・呈示結果を検討するための実験を行った。触覚センサは、4本のウイスカを30mm間隔に一列に配置し構成した。対象物は図11に形状を示すアクリル製の角柱、四角錐、立方体およびプラスチック製の球とした。なぞり動作は、図11の各対象物に対して矢印で示したように、直交する2経路それぞれの往復において、触覚センサの中心が各対象物の中心を通るように行った。

なぞり動作によるたわみ方向の検知は、ロボットハンドに触覚センサを把持させて一定方向に約10mm・s⁻¹で300mm移動させ10mmごとに行った。なぞり動作の開始位置は各対象物の中心から150mm離れた位置とした。したがって、たわみ検知位置は、いずれの場合も31箇所であり、各認識領域は長方形でなぞり方向の辺の長さが10mm、他辺が30mmである。なお、認識領域の面積を求めるための点は1mm間隔で分布させ、1つの認識領域内での数を224個とした。なぞり動作時の触覚センサの高さは一定とし、いずれの対象物に対してもウイスカの先端が各対象物の最上部から底面方向へ30mmの位置まで接触する高さとした。

呈示領域は図12に示すように縦および横にそれぞれ15ずつ格子状に設定した。各呈示領域は1辺が20mmの正方形である。

図11の対象物をなぞり認識し得た呈示結果を図12に示す。各呈示領域には、識別された要素形状の種類を図12中に記した模様で示している。なお、同図中の矢印

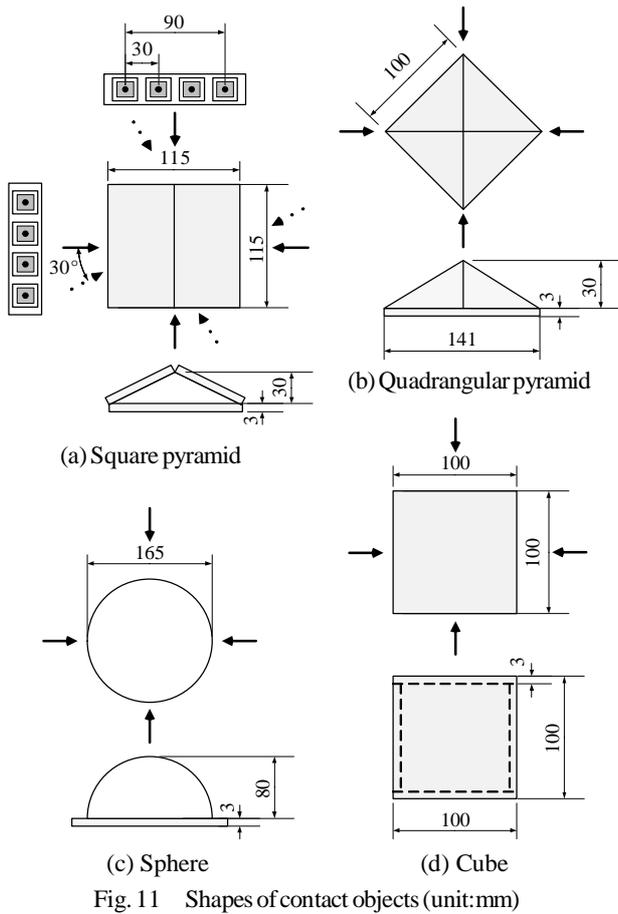


Fig. 11 Shapes of contact objects (unit:mm)

は平面の傾斜方向を示しており、それぞれの矢印が示す方向は図2中に示す通りである。また、比較のため表示領域に重ねて接触対象物の外形を破線で示した。

図12(a)に図11(a)の角柱をなぞり得た結果を示す。なお、角柱の実験では図11に実線および点線の矢印で示した異なるなぞり方向による表示結果をパターン1および2としてそれぞれ示した。図12(a)のパターン1の表示結果より、実線の矢印方向に角柱をなぞった場合には稜線がエッジとして表示され、また、平面の存在とその傾斜方向もおおよそ示されている。次に、パターン2として実線の矢印に対して図11(a)に示すように30°傾斜した点線で示す矢印方向になぞった結果では、エッジを表示できていない。これは、点線の矢印方向のなぞり動作では、稜線が2本のウィスカで挟まれないためである。しかし、図12(a)右図中に太実線で囲んだ2つの領域の平面の傾斜方向に注目すれば、互いに反対方向となっており、その境界にエッジがあることが予測される。すなわち、対象物の稜線がウィスカで挟まれずエッジが表示されない場合でも、表示結果より平面の傾斜方向から角部の存在を把握し得る。

図12(b)は図11(b)に示す四角錐をなぞり得た表示結果であり、エッジや平面の他に、頂点が稜線の交点として示している。また、図11(c)に示す球の表示結果である図12(c)では、頂点、平面の傾斜方向がともに示され

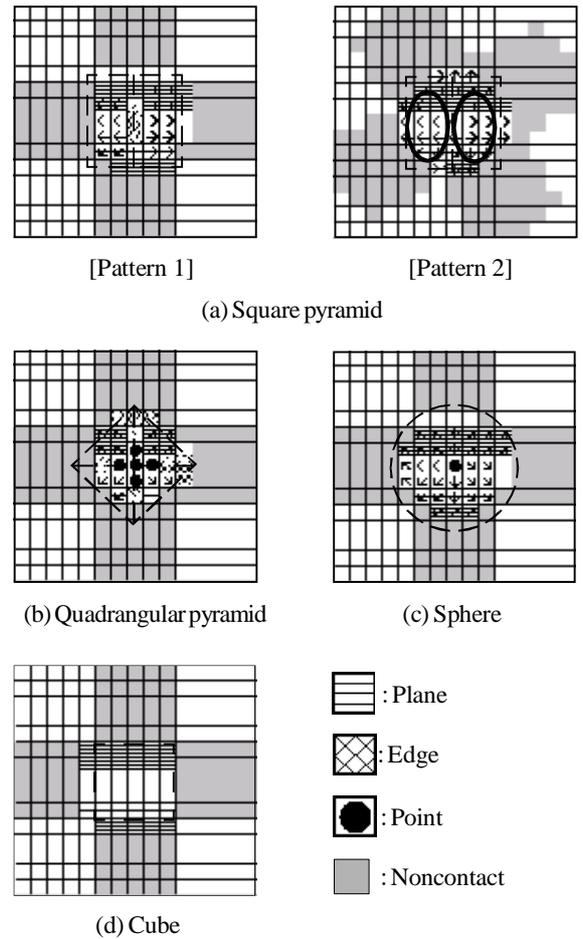


Fig. 12 Obtained display results

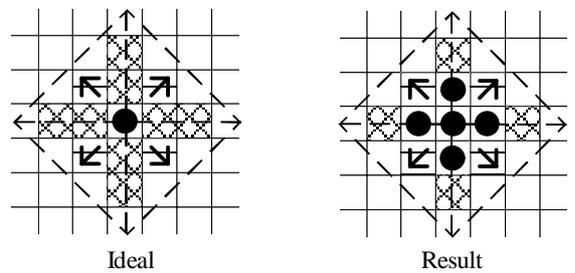
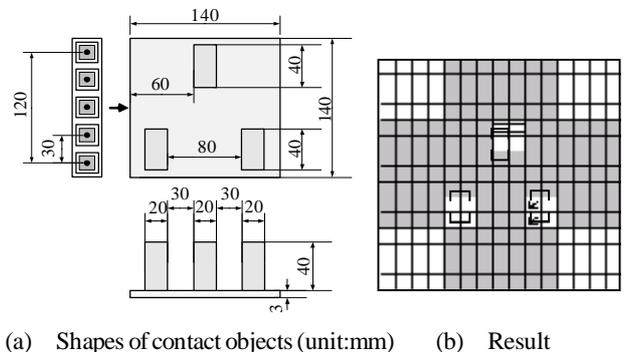


Fig. 13 Comparison of the obtained result with the ideal one



(a) Shapes of contact objects (unit:mm) (b) Result

Fig. 14 Display result of the small size objects

ており、さらに、図11(d)の立方体に対する表示結果である図12(d)では、立方体の上面がセンサのベース面に平行な平面であることが示され、いずれも各対象物の特徴がよく表されている。

ただし、いずれの表示結果においても端部付近では、

面の傾斜方向が良好に示せていない箇所や、エッジとなるべき部分が平面となっている箇所が存在する。これは、端部においてはウイスカが対象物外周に触れ、面との接触が十分に成されず非接触と認識、また、誤認識されるためである。

以上で得られた呈示結果を評価するため、図12に示した各対象物の理想的な呈示結果を求め比較する。各対象物を3・1, 3・3で述べた方法でなぞった場合に、図12中に示す格子状の呈示領域の各交点でウイスカのたわみ方向を検知したとして得られる理想的なたわみ方向を、3・2で述べたNNの学習データ作成時と同じ方法で決定し、さらに、同結果を4・1で述べたプログラムに入力して各呈示領域で示す要素形状の解を得る。得られた結果を理想的な呈示結果として図12の呈示結果と比較する。なお、比較は図12に示す対象物の外形を表す破線の内側に全域が含まれている呈示領域で行う。

例として図12(b)の四角錐を対象に得た理想的な呈示結果を図13左に、同図右に図12(b)の結果を再度示す。なお、図13中の破線は対象物の外形および稜線であり、要素形状の種類は図12と同じ模様で示している。図13の四角錐では13の呈示領域を比較する。両結果を比較すれば、要素形状が同一である呈示領域の数は9であり、比較した呈示領域総数に対する割合は69%である。同様に、角柱、球、立方体に対して比較を行った結果、呈示結果が同一となった領域の割合は、角柱[パターン1] 76%、球62%、立方体100%であった。球では呈示された面の方向が理想の結果に対し隣接する方向となった領域が多数みられた。曲面からなる球で面の方向を正確に呈示することは困難であると予想される。そこで、理想の方向と隣接した方向に呈示した領域も、理想の結果と同じ方向を示したと許容すれば、理想結果と同じ結果を示したとみなせる呈示領域の割合は86%となる。

以上の結果より、物体の形状を示す代表的な特徴である平面、頂点、エッジがほぼ予測通り示されており、本手法で接触面形状の呈示を行えることが確認される。

さらに、図14(a)に示すように短い辺の長さが20mmで、本論文で用いたウイスカの配置間隔30mmより短い複数の直方体状の突起物を有する対象物をなぞり認識した呈示結果を図14(b)に示す。ただし、1度のなぞり動作でウイスカが全ての立方体に接触するように触覚センサは図14(a)に示す通り5本のウイスカを一列に配置して構成した。

呈示結果を図14(b)に示す。上面が水平面である3個の突起物が呈示されている。前報⁹⁾では、触覚センサと対象物との接触において、ウイスカが一つの突起物表面の縦および横のいずれの方向にも2本以上同時に接触する必要があり、例えば図14(a)に示す寸法の突起物を認識するためにはウイスカを20mm未満の間隔で縦横に配置する必要があった。しかし、なぞり動作による認識では、突起物表面の縦または横いずれかの方向の幅がウイスカの配置間隔より短い場合でも、ウイスカのたわみ方向を突起物の短辺の長さより短い間隔で検知することで、図14(b)に示す通り形状を呈示可能である。

5. 結 言

本論文で得られた結果を以下に要約する。

- (1)一列に配置した少数本のウイスカからなる触覚センサを用いて対象物表面をなぞり、複数位置でウイスカのたわみ方向を識別し、対象物の表面形状を認識する方法を提案した。
- (2)直交する2経路それぞれの往復方向のなぞり動作で得た複数の表面形状認識結果から、より正確に対象物の形状を判別し、さらに、接触面全体にわたり形状を呈示する方法を示した。
- (3)提案する触覚センサを用いたなぞり動作による検知結果から、対象物の表面形状を認識・呈示するプログラムを作成し、複数の対象物を用いて実験を行い、いずれの場合も表面形状を良好に呈示できることを示した。

なお、本論文では接触物に対するなぞり動作の方向、高さ、回数を一定としたが、今後はこれらを調整し、より正確に表面形状の呈示を行うことを課題とする。

文 献

- (1) Tachiya, H. · Kaneno, S., A Basic Study on the Tactile Sensor with Multi Artificial Whiskers, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.66, No.650(2000), pp.3336-3343.
- (2) Tachiya, H. et al., Recognition Method to Vary a Contact Area for the Tactile Sensor with Multi Artificial Whiskers, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.71, No.704(2005), pp.1308-1315.
- (3) Yamashita, Y. · Tachiya, H., Display of Surface Shapes of Contact Objects by the Tactile Sensor with Multi Artificial Whiskers, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.72, No.718(2006), pp.1793-1800.
- (4) Kaneko N. et al., Active Antenna for Contact Sensing, *IEEE Trans. Robo. Autom.*, Vol. 14, No. 2 (1998), pp. 278-291.
- (5) Kaneko N. et al., Tracing Type Artificial Active Antenna, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 18, No. 8 (2000), pp.1173-1179.
- (6) Mabuchi, N. et al., *Basic and Application of Neural Net Work* (in Japanese), (1997), pp. 4-27., Kyoritsu Shuppan Co., Ltd.