

視覚情報を利用した触覚形状呈示装置の試作

呉 景龍¹・佐々木英人²・川村貞夫³

¹ 機械工学科 ² 機械工学科4年 ³ 立命館大学理工学部ロボティクス学科

一般に、触覚形状情報を呈示することは困難である。一方、心理学の研究より人間の視触覚は錯覚・融合特性が存在している。つまり、人間は正確な触覚情報を呈示されていなくとも視触覚を通じて実物体の曲面を認識している。そこで、人間の視触覚の錯覚・融合特性を利用して触覚ディスプレイの簡略化を図ることができる。このような目的から人間の視触覚融合領域を調べ、定量的に解析した。この結果に基づいて、4種類の曲率パターンをもった触覚ユニットが作られている。本研究では、親指、人差し指および中指を用いて物体を掴む場合を想定している。これらの指の軌道を測定し、軌道モデルを設計した。さらに、軌道モデル上を移動する機構や回転する機構をもつ3個の触覚ユニットをもった触覚形状呈示装置を試作した。

Key Words: *Human Visual and Tactile Sensory Fusion, Curved Surface Recognition, Virtual Reality, Tactile Curved Surface Display.*

1. 緒言

バーチャルリアリティ (Virtual Reality) 工学は宇宙開発、臨場感通信、医療、スポーツといった様々な分野において広く利用されつつある。この技術については、視覚系を中心に様々な研究がなされている^{1), 2)}。しかし、バーチャルシステムの臨場感を高めるには触覚情報の呈示が要求される。例えば、遠隔操作マニピュレータによる緻密な作業をカメラからの視覚情報のみで操作するのは困難である。そこで、触覚においても物体の形状を呈示することができれば、より仮想環境に没入できるようになり、違和感なく操作することができるものと期待されている。

本研究では、指先に物体の形状を呈示することができる触覚形状呈示装置の開発を目的としている。ここで、問題点を挙げると次のようになる。

- 指先の自由度は指1本につき6自由度であり5本指では30自由度となる。
- 5本の指先に形状情報を同時に呈示するため、装置の移動可能な範囲に制限がある。
- 物体の形状は多種多様である。

従って、ハードウェアのみで触覚形状情報を呈示することはシステムが複雑となり、困難である。そこで、視触覚の錯覚・融合特性の利用が考えられる。形状情報を人間の指先と目に同時に呈示することによって、数パターンの触覚情報のみで全ての曲率を呈示できることを調べ、考えられる最小の4パターンの曲率で構成した触覚ユニットが

設計されている。

本研究では、親指、人差し指および中指の3本指で2次元曲面をもった物体を掴むという状況を想定し、触覚形状呈示装置を製作する。そのため、まず3本指でものを掴むときの運動軌道を測定し、軌道モデルを決める。この軌道モデル上に触覚ユニットを配置し、同時に立体的な物体形状の視覚情報も呈示することによって視触覚融合現象を利用して触覚形状情報を数パターンで済むようにする。さらに、製作された触覚形状呈示装置を用いて性能評価実験を行い、装置の有効性を実証する。

2. 視触覚の融合特性

2.1 実験方法

人間は外界について複数の感覚からの情報を融合して認識している。一方、心理学の研究により触覚にも錯覚現象が存在することが分かっている³⁾。このことより、人間に感覚情報を呈示するとき、必ずしもそれぞれの感覚器官に正確な情報を呈示する必要はないと思われる。コンピュータグラフィックス技術の発達した現在では、比較的容易に正確な視覚情報を呈示することが可能になってきた。視覚情報を利用した触覚形状呈示装置では、視覚ディスプレイからの視覚情報を主として呈示し、触覚情報は人に違和感を与えない程度の最小限度の情報を用意すればよいと考える。そこで、必要な触覚情報のパターンを調べるため、

2次元曲面の曲率認識における視触覚の融合実験を行なった⁴⁾。Fig. 1に実験の概要を示す。

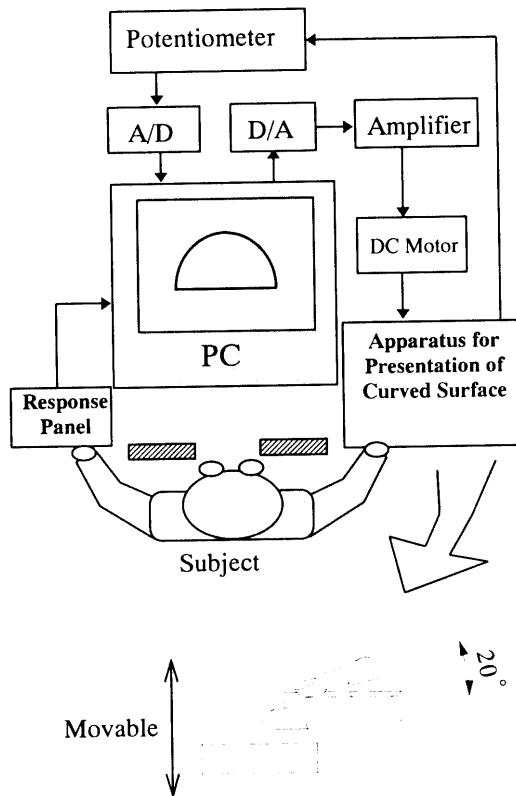


Fig. 1 The experimental system for visual and tactile sensory fusion of curved surface recognition

2.2 実験結果

2次元曲面の曲率認識における視触覚の融合特性の3名の被験者の実験結果を平均したものがFig. 2(a)~(i)である。これらの図はいずれも横軸が試料片の直径と異なる視覚刺激の直径を示しており、縦軸が違和感のない割合すなわち融和感率を表している。融和感率とはこの場合、実験回数に対して違和感がないと回答した回数の割合である。

各図の曲線は最小自乗近似法によって求めた実験結果の近似値である。Fig. 2(a)は試料片の直径が4[mm]の実験結果である。この結果は、われわれが直径4[mm]の触覚曲面を触る時にある範囲の視覚曲面に対して違和感がないことを意味している。すなわち、視覚情報を利用すれば1つの触覚刺激パターンがある範囲の曲率情報を呈示できると考えられる。この範囲を視触覚融合範囲と呼ぶ。Fig. 2(a)に示されているように、融和感率が40%の視触

覚融合範囲 (Fusion Area) はFA₄₀である。

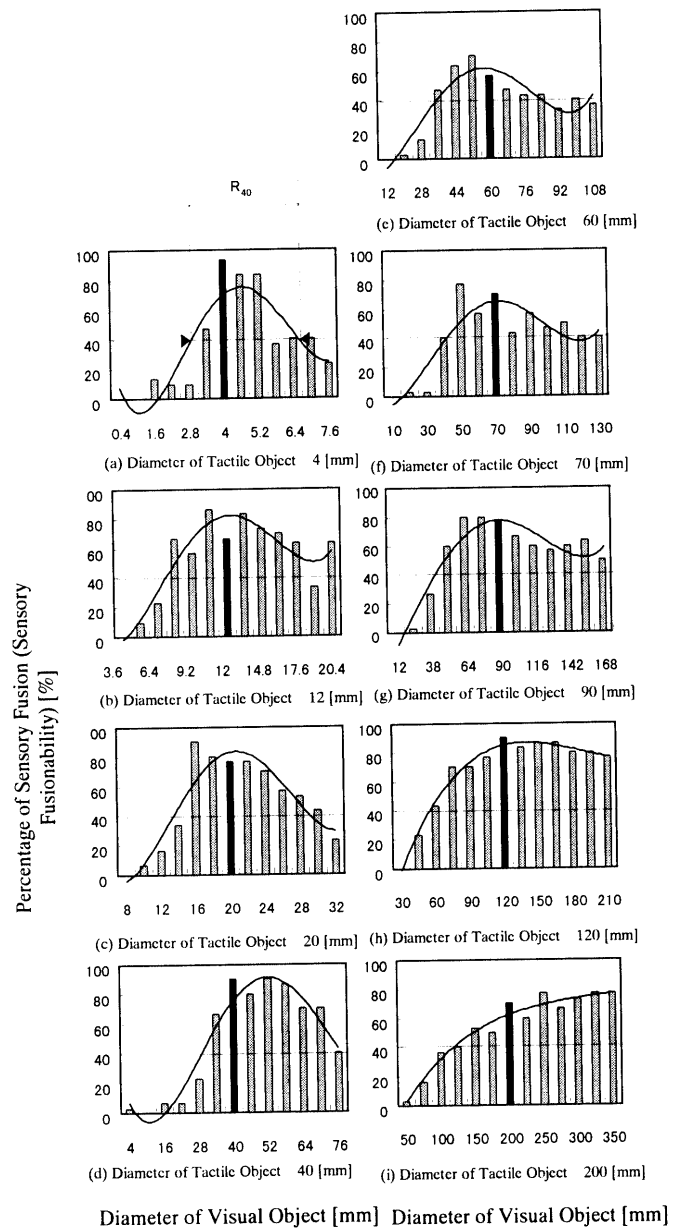


Fig. 2 The measurement results of the sensory fusion range on curved surface recognition. The solid curves show approximate values which are calculated by expressions of four orders with the method of least-squares.

2.3 触覚ユニットの設計

Fig.2の融和感率が40%の視触覚融合範囲をまと

め、グラフにした結果は Fig.3 に示されている。

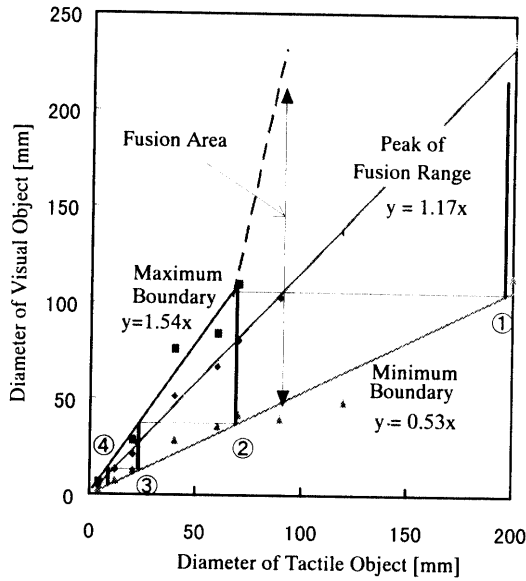


Fig. 3 The boundaries, the peaks and the sensory fusion areas of the sensory fusion range on curved surface recognition

実線 $y = 0.53x$ と $y = 1.54x$ は最小自乗近似法によって求めた融合領域の下限値と上限値である。Fig. 3 に示されているように、視覚情報を併用することによって4つの触覚刺激パターンですべての触覚情報を呈示できる。

Fig. 3 の曲率情報のパターン化において融和感率 40%を違和感有無の閾値とした場合の必要パターン数をもとにして、曲率 $R = 4.5, 11.5, 31.5$ および $91.5[\text{mm}]$ の4種類の触覚パターンを用意すれば視覚情報を併用することによって全ての2次元曲率情報を呈示できると考えられる。1本指に対して4種類の触覚パターンを呈示するために1つの直方体の4つの側面それぞれに曲率 $R = 4.5, 11.5, 31.5$ および $91.5[\text{mm}]$ の曲面を削り込んだものをつくり、これを触覚ユニットと呼ぶ。この触覚ユニットの構成を Fig. 4 に示す。この触覚ユニットを回転させることによって、4種類の触覚パターンが切り替えられ、各種の2次元曲面を指先に呈示することが実現できる。

3. 触覚形状呈示装置の設計

3.1 指の軌道の測定及び軌道モデルの設計

一般的に、物を掴む時には親指、人差し指および中指が主として用いられ、薬指、小指はそれに補助的に用いられていると考えられる。そこで、今回親指、人差し指および中指の三本のみで物を

掴む場合を想定し、垂直平面上における指の運動軌道を調べた。この測定結果から軌道モデルを求め、この軌道モデル上に触覚ユニットを配置することによって触覚形状呈示装置を構成する。親指、人差し指および中指の軌道を調べるために、以下の方法を採用した。

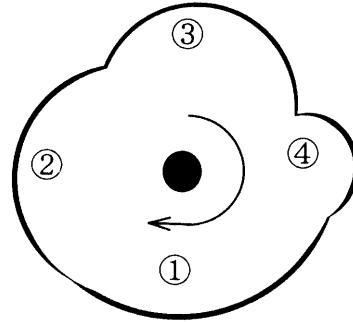


Fig. 4 A sectional design of four tactile surface patterns (①~④) are carved on an acrylic columnar, they can be rotate to change the curved surface for presentation.

- ① 被験者の指先に鉛筆の芯を貼り付け、腕を水平に固定して鉛直平面上にて三本の指を物体を掴むように動かしてもらい、指の運動軌道を得た。
- ② 人差し指と中指の軌道の終点を通る線分およびその線分と平行で親指の軌道の終点を通る線分、そしてこれらの線分に対して垂直で人差し指または中指の軌道の終点を通る線分が描く長方形の中心と各々の指の軌道の始点を結び基準線とする。ただし、三個の触覚ユニットの中心が最も近づくことのできる半径 23[mm] の円内は除外する。
- ③ 各々の基準線を十分割し、各分割点における垂線と指の軌道との交点をプロットした。

なお、被験者は3名の20代男性であり、各被験者に対して5回ずつ測定した。この手順で測定した結果を Fig.5 に示す。これを基に指の軌道モデルを設計した。Fig.5 より親指および中指の軌道はほぼ直線とみられるので直線で近似した。同様に人差し指は2次曲線で近似した。こうして得られた軌道モデルが Fig.5 の実線である。この指の軌道モデル上に触覚ユニットを配置することによって触覚形状呈示装置を構成する。

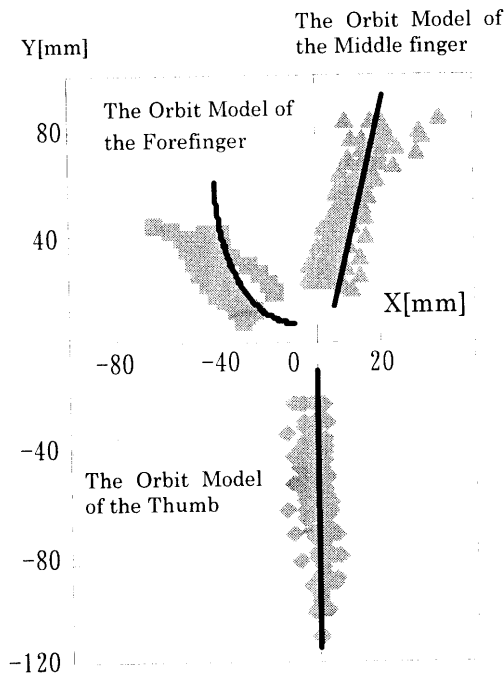


Fig.5 Result of the orbits of thumb, forefinger and middle finger and the orbit models

3.2 触覚形状呈示装置の構造

今回、触覚形状呈示装置を設計するにあたって、人間の視触覚の錯覚・融合特性を利用することを考えている。つまり CRT からの視覚刺激を主として呈示することで、親指、人差し指および中指の三本の指先への触覚刺激は触覚ユニットがもつ4種類の曲面パターンの中に簡略化する。このように設計した触覚形状呈示装置の概念図を Fig. 6 に示す。

触覚形状呈示装置の構成としては大きく2つの機構ブロックに分けられる。一つは触覚ユニットを回転させて呈示すべき2次元曲面を指先に向けさせる回転機構ブロックである。この回転機構ブロックは親指(Thumb)、人差し指(Forefinger)および中指(Middle finger)に対して触覚刺激を呈示する触覚ユニット(T), (F)および(M)それぞれに1組ずつある。もう一つは、回転機構ブロックを乗せた台車が指の軌道モデル上を移動するための機構ブロックである。このように設計された触覚形状呈示

装置の機構概略図を Fig.8 に示す。

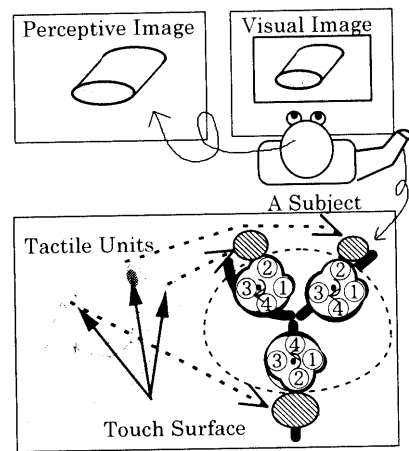


Fig. 6 The concept of the tactile display

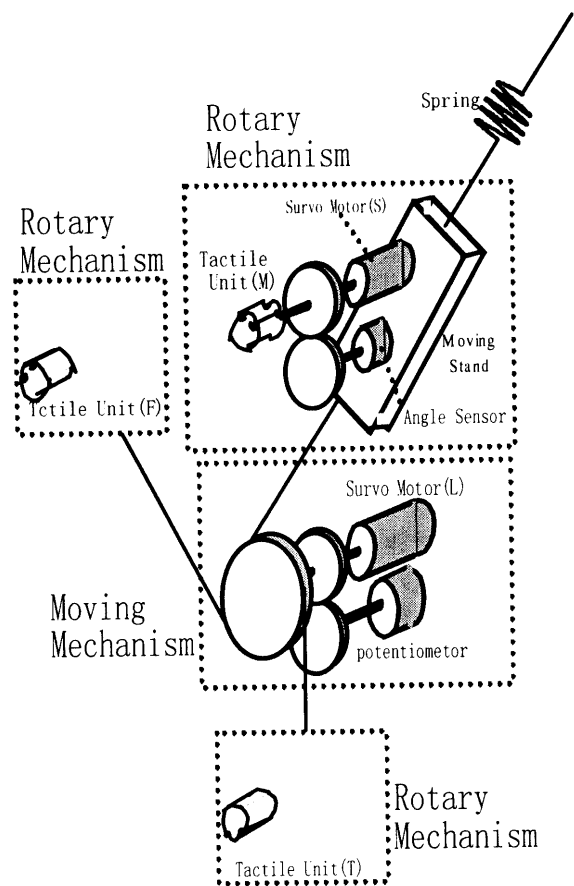


Fig. 7 Image of the Tactile Display

(a) 回転機構ブロック

Fig. 8 に示されているの回転機構ブロックではサーボモータ(S1~3) (MAXON MOTOR)が回転す

ることによって触覚ユニットの4種類の2次元曲面パターンが切り替えられる。これらはD/A変換器からの命令により触覚ユニットの呈示すべき2次元曲面を指の軌道モデルと垂直になるよう、角度センサ(1)、(2)および(3) (MIDORI CP-2FK(b))により曲面の向きが検出されROBOT DRIVER(2)、(3)および(4)によってフィードバック制御が行われる。

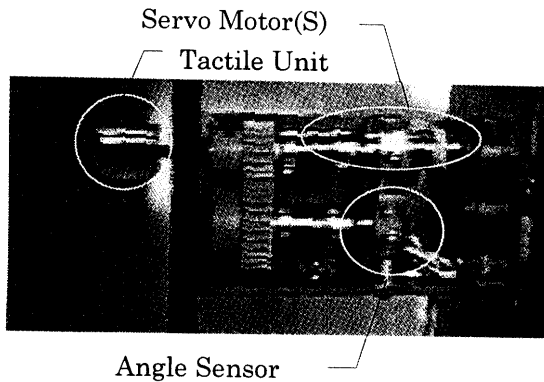


Fig. 8 The rotary mechanism for the tactile unit

(b) 移動機構ブロック

三つの触覚ユニット(T)、(F)および(M)を乗せた台車は Fig.5 の指の軌道モデル上を軌道の中心に置かれたサーボモーター(L) (Hi-T Drive SURVO ACTUATOR RH-8-3002-T) によって台車に取り付けられたワイヤを巻き取られることにより移動される。これはD/Aの0チャンネル(0ch)から命令して正回転させるとワイヤが引っ張られることにより台車同士が近づく。逆回転させるとワイヤと逆向きに台車に付けられたバネにより離れようとする。このとき、ポテンシオメーターによりワイヤの長さが検出されROBOT DRIVER(1)によりフィードバック制御が行われる。この移動機構ブロックの様子を Fig.9 に示す。

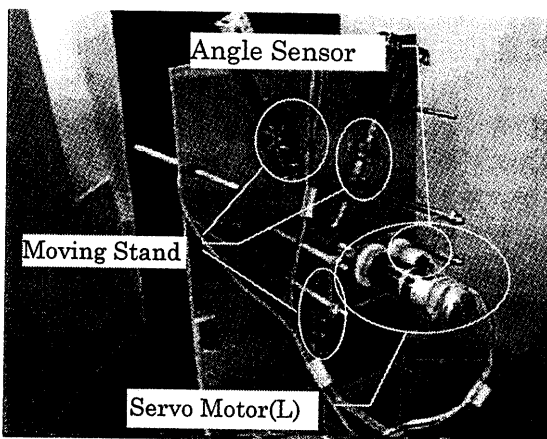


Fig. 9 The moving mechanism of the tactile units

このようにして設計された触覚形状呈示装置のシステム図を Fig. 10 に示す。

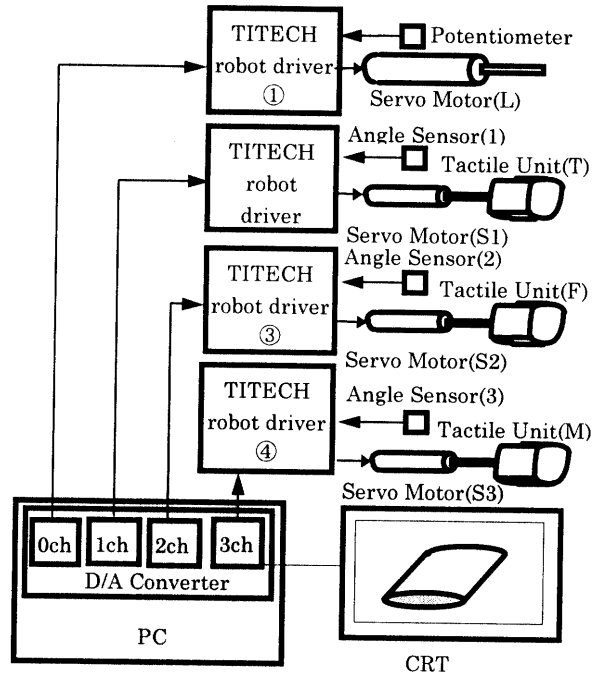


Fig. 10 Schematic diagram of the tactile display

4. 触覚形状呈示装置の性能評価実験

4.1 性能評価実験の概要

試作された触覚形状呈示装置を用いて触覚刺激の呈示を行い、同時にCRTより視覚刺激を呈示することによって融和感率が40%の視触覚融合範囲FA₄₀を測定し、本装置の有効性を調べる。本実験においてCRTより呈示される視覚刺激としては断面形状が分かるような向きの円筒形および手のイメージを呈示する。そして、被験者には手のイメージの大きさを基準として円筒形の寸法を判断してもらった。実験の様子を Fig. 11 に示す。

4.2 性能評価実験の手順

製作された触覚形状呈示装置を用いて呈示可能な円筒形の直径の範囲を調べた。触覚刺激としては触覚形状呈示装置より触覚ユニットのもつ曲率R=11.5, 31.5 および 91.5[mm]を親指、人差し指および中指に対して同一パターンを呈示する。また触

覚刺激の大きさ(軌道の中心から各触覚ユニットまでの距離の2倍) $D=60, 70, 80, 90$ 及び $100[\text{mm}]$ とした。視覚刺激としては直径 $d=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190$ 及び $200[\text{mm}]$ の円筒形を呈示する。つまり1回の実験では300通りの触覚刺激と視覚刺激の組み合わせがランダムに呈示され視覚と触覚の2種類の情報間の違和感の有無の回答を被験者に求める。被験者は3名の20代男性で、実験回数はそれぞれ20回である。

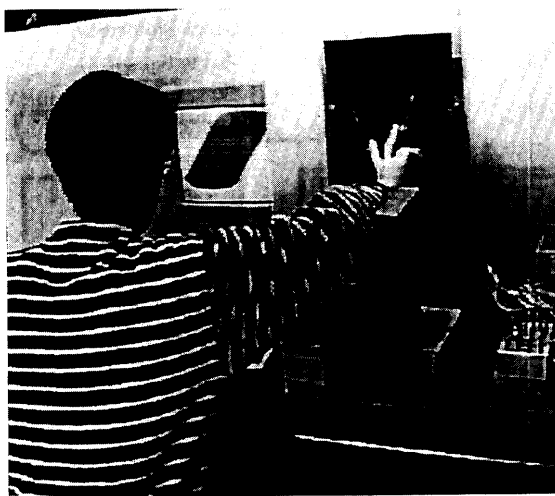


Fig. 11 Overview of the evaluated examination of the tactile display

4.3 性能評価実験の結果

性能評価実験の被験者3名の結果を平均したのがFig. 12である。このグラフは横軸に視覚刺激となる円筒形の直径 $d[\text{mm}]$ を、縦軸に融和感率 $[\%]$ をとったものである。

この結果より、直径が $45\sim 150[\text{mm}]$ の範囲の円筒形を呈示したい場合、触覚ユニットが呈示する2次元曲面の曲率 $R=31.5[\text{mm}]$ の1パターンのみを用い、大きさを呈示したい直径に合わせることで十分であることが分かる。ただし、呈示したい円筒形の直径が $45\sim 60[\text{mm}]$ の範囲では $R=11.5[\text{mm}]$ の曲率の2次元曲面を、 $150[\text{mm}]$ の時は $R=91.5[\text{mm}]$ の曲率の2次元曲面を用いた方が良いと考えられる。

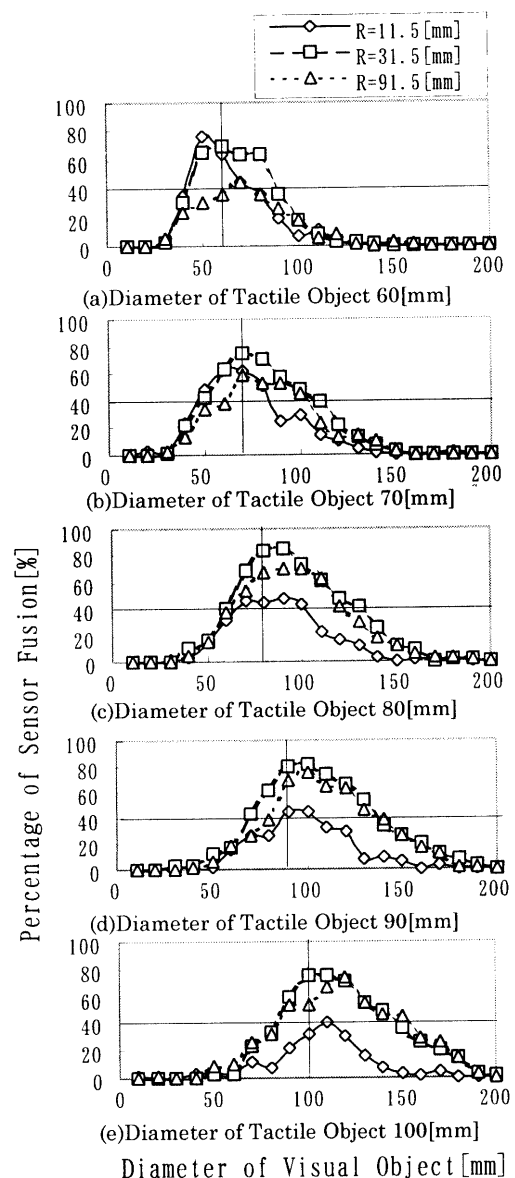


Fig. 12 Results of evaluated examination

5. 結言

本研究では、人間の視触覚融合特性を利用して4種類の触覚パターンのみですべての2次元曲面を呈示できるよう設計した触覚ユニットを用いて、触覚形状呈示装置を製作した。そこで、親指、人差し指および中指で物体を掴む場合を考え、この3本指の軌道を測定、軌道モデルを決めた。そして、この軌道モデル上に触覚ユニットを配置して触覚刺激を呈示する触覚形状呈示装置を試作した。製作された触覚形状呈示装置について、代表的な2次元曲面として円筒形を選んで性能評価実験を行なった。その結果、円筒形を直径で $45\sim 150[\text{mm}]$

の範囲で呈示できることが分かった。

今回は CRT より視覚刺激を呈示したが、この方法では触覚刺激のある方向とは別の向きに利用者を向かせることになり、馴染みにくいことが分かったので、HMD(Head Mounted Display)を使って触覚刺激のある方向に向くことができるように改良する予定である。

参考文献

- 1) Jing-Long Wu, Masaomi Nakahata and Sadao Kawamura, A New Head Mounted Display System with Adjustable Display for High Depth-Performance, Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Canada, Vol.1, pp.298-303, 1995.
- 2) Jing-Long Wu, Masaomi Nakahata and Sadao Kawamura, Measurement of Binocular Stereoacuity for Design of Head Mounted Display with Wide View, Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Beijing, Vol.2, pp.929-934, 1996.
- 3) B.Gillam, Geometrical Illusions, Scientific American, Vol.242(1), pp.86-95, 1980.
- 4) 呉 景龍, 川村 貞夫, “視覚情報を利用した触覚呈示装置の設計”, 日本機械学会創立 100 周年記念, 中国四国支部記念式典・講演会, pp.105-106, 1997.

(1998. 5. 15 受理)

A TRIAL OF TACTILE CURVED SURFACE DISPLAY WITH USING VISUAL INFORMATION

Jing-long WU, Hideto SASAKI, Sadao KAWAMURA

In general, it is difficult to present tactile information of curved surface because arbitrary curvatures of the curved surface and many degrees of freedom are need to realize. On the other hand, psychophysical studies suggested that human visual and tactile sensations have illusory fusion characteristic. It means that we can recognize curved surface of objects through visual and tactile sensations, even if exact tactile information is not presented. Hence, by utilizing human characteristic of sensory fusion, realization of a tactile display can be simplified. From such motivation, the human fusion characteristics on visual and tactile sensation are measured, and are quantitatively analyzed. Based on the analyzed results, a tactile unit which have only four curved patterns is developed. In this study, we suppose the subject grasps a object with thumb, forefinger and middle finger. Accordingly we measured orbits of these fingers and designed orbit models. And we made a tactile display which has three tactile units with moving mechanism on the orbit models and rotary mechanism. The tactile display has high performance which is proved by an evaluated experiment.