人間の視触覚の融合特性に基づく触覚形状呈示装置の設計*

呉 景 龍^{*1}, 森田 星 輝^{*2}, 川村 貞 夫^{*3}Design of a Tactile Curved Surface Display Based
on Human Visual and Tactile Sensory Fusion

Jing-Long WU, Seiki MORITA and Sadao KAWAMURA

In general, there is no good hardware of tactile curved surface display for tele-robot and virtual reality, because to present the curvature of the curved surface with continuous values is too difficult. On other hand, in the psychophysical studies, human visual and tactile sensations have illusory fusion characteristics. Namely, the human sensory quantity on size, position and orientation of object is different from the real quantity. Therefore, we can recognize curved surface of real objects through visual and tactile sensations, even if exact tactile information is not presented. Furthermore the visual information is realize easily by computer graphical technology. So, by utilizing human characteristics of sensory illusory fusion, realization of the tactile curved surface display can be simplified. In this study, human fusion characteristics are measured by psychological experiments, and a tactile curved surface display is designed based on the results of the experiments. In the designed tactile display, only some curved patterns are utilized of instead of presenting many curved surface patterns. Namely, using the human sensory fusion characteristics on visual and tactile sensory fusion, the display of tactile curved surface is simplified.

Key Words: Human Engineering, Human Interface, Biomechanics, Intelligent Equipment, Recognition, Virtual Reality, Tactile display

1. 緒 言

近年, コンピュータ技術の発達などにより, 人工現実工学, 遠隔操作ロボットなどの分野がマンマシンインターフェースの性能向上において重視されてきている。現在, これらの分野において人間に情報を呈示する場合, 視覚情報の呈示装置が主流となっている^{(1)~(3)}。ところが, 人間は自分を取り巻く環境を視覚だけでなく, 五感を通じて認識しており, 特に機械を操作するとき触覚情報が重要な役割を果たしている。したがって, 触覚情報を呈示することができれば, より高臨場感のある人工現実感を実現できると思われる。本研究では, 人間の視触覚融合特性に基づいて触覚形状呈示装置を設計する。

従来の研究には, 多本の細い針先端による小型形状呈示装置と, 平面呈示装置などの研究開発がある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし, 曲率が連続的に変化する曲面の呈示装置の製作は非常に困難である。一方, 認知科学の研

究より, 人間の視触覚には錯覚現象が存在する^{(6)~(12)}。さらに, 視覚と触覚による形状認識においては視触覚情報が統合され, 視覚情報が重視されることを報告している⁽¹³⁾。また, コンピュータグラフィックス技術の進歩によって, 三次元映像が容易に呈示できる。そこで, われわれは人間の視触覚特性に基づいて視覚情報を併用することより触覚形状呈示装置の簡略化が可能となると考え, 検討を行っている。図1の例を用いて視覚情報を併用した触覚形状呈示装置の概

Fig. 1 An example to explain the concept of the tactile curved surface display with using visual information

* 原稿受付 1998年7月21日。

^{*1} 正員, 香川大学工学部 (☎ 760-8526 高松市幸町1-1)。

^{*2} (株)日立製作所ストレージシステム事業部 (☎ 250-0872 小田原市中里322-2)。

^{*3} 正員, 立命館大学理工学部 (☎ 525-8755 草津市野路東1-1)。

E-mail: wu@eng.kagawa-u.ac.jp

念を説明する。視触覚の融合特性に基づく触覚形状呈示装置の考え方は、曲率が不連続に変化する曲面〔図1(b)〕を触覚に呈示すると同時に連続的に変化する視覚情報〔図1(a)〕を呈示することにより、曲面が連続的に変化するような感覚効果が得られることである。曲率が連続の視覚の曲面情報はコンピュータグラフィックス技術より容易に生成される。触覚のいくつかの異なる形状曲面を用意すれば、視触覚情報を同時に呈示することによって触覚曲面の曲率が連続的に変化する感覚的效果が得られ、触覚形状呈示装置は簡略化されることが考えられる。

本報告では、実験装置を製作し、触覚形状呈示装置を設計するための基礎データとなる人間の曲率認識と視触覚融合特性を測定する。さらに、測定した結果に基づいて視覚情報を併用した触覚形状呈示装置を設計する。まず第2章で触覚における曲面と平面を知覚する閾値の測定方法と測定結果を述べる。第3章では、視触覚の融合特性の測定方法と測定結果を述べる。最後に視触覚融合特性の実験結果に基づいて触覚形状呈示装置を設計し、その結果と今後の課題について述べる。

2. 曲面と平面の知覚閾値の測定

人間が手で曲面を触るとき、曲面の曲率直径が十分大きくなると平面であると判断されることは十分予想できる。すなわち、曲面と平面を知覚する触覚閾値が存在する。触覚形状呈示装置においては、曲率直径が触覚閾値より大きい曲面は平面として考えればよいと思われる。したがって、触覚形状呈示装置を設計するためには、人間の曲面と平面を知覚する閾値の測定が必要となる。本研究では、二次元曲面を検討対象とする。

2.1 測定装置 曲面と平面を知覚する触覚閾値と視触覚融合範囲(3章で説明する)を測定するため、図2に示されている実験装置を製作した。被験者に呈示する触覚試験片は上下移動台に載せられ、移動台の上下移動はD/Aボード、増幅器とDCモータを通じてパーソナルコンピュータによって制御される。曲面と平面を知覚する触覚閾値を測定する実験では、被験者の視覚情報がシャッターによってカットされる。実験は反応キーによるパソコンとの会話によって遂行される。

2.2 測定方法 被験者には視覚情報を呈示しないようにし、材質がアクリルの試験片を触覚情報として呈示する。被験者に呈示する試験片は、平面の場合と直径が10, 40, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 200 mmである10種類の半円柱側面の場合のあわせて11

Fig. 2 The experimental system for measurement of curved surface recognizable threshold and sensory fusion range of visual and tactile

Fig. 3 The experimental results of curved surface recognition for four subjects A, B, C and D

種類である。試験片を被験者の指先に接触する時間は250 msであり、試験片と指先との接触角度は20°である。このような実験条件の下で、11種類の試験片をランダムに被験者に呈示することにより測定を行う。その際、被験者に曲面に感じるか平面に感じるかの回答を求める。被験者は4名の男性で、同じ条件での実験回数は20回である。

2.3 測定結果および考察 4名被験者の測定結果を図3に示す。図3の縦軸は全実験回数に対して曲面と認識する回数の割合を示し、横軸は呈示した触覚刺激の直径を示している。図3より、個人差が見られ

るが、触覚刺激の直径の増加に伴って曲面と認識する割合が減少する共通結果が得られた。すなわち、触覚刺激の直径が100 mmまでは100%近い割合で曲面を認識できているが、触覚刺激の直径が120~150 mmになると曲面と認識する割合は極端に減少する。さらに、それよりも触覚刺激の直径が大きくなると曲面認識率が50%を下回り、このことから触覚刺激直径が150 mmを超えるような曲率の場合では、曲面と平面の判断が困難であると考えられる。曲面認識率が50%となるとき触覚刺激の直径を閾値として定義すれば、曲面と平面の知覚閾値は図3に示されているように175 mmである。本実験の結果は触覚形状呈示装置を設計するとき最大曲面の直径が曲面と平面の知覚閾値の近傍でそれより大きい値に設定すればよいことを意味している。

3. 曲面認識における 視触覚融合特性の測定

従来の錯覚の研究より^{(6)~(12)}、曲率が異なる二つの曲面をそれぞれ人間の指先と目に呈示するとき、人間がそれらの曲率の差異を識別できない場合があると考えられる。すなわち、人間は視覚刺激と触覚刺激の間にある範囲での差異があっても区別できない特性があると思われる。このような特性を視触覚融合特性と呼ぶ。視覚情報を利用した触覚形状呈示装置を設計するため、曲面の視触覚融合特性を定量的に測定する必要がある。

3.1 測定装置 視触覚融合特性を測定する装置は図2に示されている。視覚情報はパーソナルコンピュータのCRTのスクリーン上(15 inch)に呈示される。被験者の眼球とスクリーンとの距離は670 mmである。被験者の視野は視覚刺激としての曲面画像だけに見えるように制限されている。触覚情報は、被験者が見えないように、上下移動台に載せられている触覚試験片によって呈示される。

3.2 測定方法 被験者に呈示する触覚試験片は、直径が4, 12, 20, 40, 60, 70, 90, 120と200 mmの9種類のアクリル半円柱である。視覚情報としては、それぞれの試験片(触覚情報)に対して直径が異なる13種類の試験片の断面画像(うち1種類は触覚情報と同等)の中から1種類の画像がCRTの画面上に呈示される。1回の実験では、9種類の触覚刺激と117種類の視覚刺激がランダムに呈示される。視覚刺激と触覚刺激を同時に呈示し、被験者に視覚刺激と触覚刺激の間に違和感があるかないかの回答を求める。被験者は4名の男性で、同一条件での実験回数はそれぞれ20回

である。

3.3 測定結果および考察 4名被験者の測定結果は共通な特徴が見られ、それらの平均値を図4に示す。横軸は視覚刺激の直径を示し、縦軸は違和感のない割合すなわち融和感率を表している。図4(a)~(i)はそれぞれ触覚刺激の直径が4~200 mmの9種類の測定結果である。図4の縦棒は測定した実験結果であり、曲線は4次の最小二乗近似式によって得られた計算結果である。図4(a)は触覚刺激の直径が4 mmの視触覚融合特性の測定結果を示している。図4(a)よりわかるように、人間が直径4 mmの触覚曲面に触れていて視覚刺激の直径が4~5.2 mmの範囲で高い融和感率が得られる。違和感の有無の閾値を融和感率60%あるいは40%と2種類設定することにして、その交点から融和領域(違和感のない領域)は R_{40} と R_{60} に示される。同様、その他の触覚刺激に関しても融和領域が求められる。本実験の結果は、視覚情報の併用によって一つの触覚刺激がある範囲の触覚曲面を呈示できることを意味している。

4. 触覚形状呈示装置の設計

4.1 視触覚融合領域の算出 図4から、視触覚の融和感率の近似曲線と融和感率が40%あるいは60%の線の交点を計算することより、融和領域を得る。同時に以上の二つの融和領域の境界値の平均を求め、その値を融和感率のピークとする。以上の方法で図4より得られた結果を表1に示す。表1の中で数値が表示されていないものは、データの都合で計算できなかったものである。

4.2 触覚呈示情報のパターン化 表1に示されている融和領域と触覚刺激の直径値の関係をグラフ化して、その関係を数式で表す。また、そのグラフから、あらかじめいくつかのパターンの情報を用意しておけば呈示すべき情報をすべてまかなえるかを作図により求める。具体的には、横軸に触覚刺激の直径、縦軸に視覚刺激の直径をとることにより表1は図5のようになる。図5(a)と(b)はそれぞれ違和感の有無の閾値を融和感率60%あるいは40%との二つの場合に対応するものである。図5に示されている一次近似数式 $y=1.34x$ と $y=1.54x$ はそれぞれ60%と40%融和感率場合の融和領域の上限である。 $y=0.82x$ と $y=0.53x$ はそれぞれ60%と40%融和感率場合の融和領域の下限である。 $y=1.17x$ は視触覚の融和領域のピークを示している。図5(a)と(b)をもとにした曲面情報のパターン化の例をそれぞれ図6と7に示す。これらの図に示されるようなパターン数の触覚刺激をあらかじめ

Fig. 4 The measurement results of the sensory fusion range on curved surface recognition. The solid curves show approximate values they are calculated by expressions of four orders with the method of least-squares

用意しておけば、すべての触覚情報を違和感なく呈示できることがわかる。

図6に示されているように、触覚情報のパターン化については、融和感率60%を違和感の有無の閾値とした場合は七つの曲面パターンですべての曲面情報が呈示できる。図7に示されているように、融和感率40%を違和感の有無の閾値とした場合は四つの曲面パターンですべての曲面情報が呈示できることがわかる。

4・3 触覚形状呈示装置のユニット 4・2節の解析より、視触覚の融和感率60%または40%を違和感の有無の閾値にすれば、すべての曲面情報はそれぞれ七つまたは四つの曲面パターンで呈示できると考えら

れる。ここでは、一例として四つの曲面パターンで曲面情報を呈示する触覚形状呈示装置のユニットを設計する。図7に示されているように、四つの曲面パターンの直径は183, 63, 23および9 mmである。このような4種類の触覚パターンを用意すれば触覚情報の併用によってすべての二次曲面情報を呈示できると思われる。そこで、直径が200 mmの一つの長方体の四つの側面それぞれに直径 $D=183, 63, 23$ および9 mmの曲面を削り込んだものを設計する。それを触覚形状呈示装置の曲面ユニットと呼ぶ。このように設計された触覚呈示装置の曲面ユニットの断面図は図8に示す。このユニットを回転させることによって、四つの曲面

Table 1 Sensory fusion ranges and peaks of sensory fusionability from Fig. 4

DTO	Threshold[60%]			Threshold[40%]			PSF
	MAV	MIV	SFR	MAV	MIV	SFR	
4	5.8	3.6	2.2	6.6	2.9	3.7	4.7
12	16.9	8.8	8.1	-	7.1	-	-
20	26.3	15.6	10.7	29	13.5	15.5	20.4
40	70	35	35	76	29	47	54
60	67	52	15	84	36	48	59.8
70	86	59	27	110	42	68	74.3
90	129	56	73	-	40	-	-
120	-	73	-	-	49	-	-
200	-	187	-	-	114	-	-

DTO: Diameter of the Tactile Object; SFR: Sensory Fusion Range; MAV: MAXimum Value of sensory fusion range; MIV: MINimum Value of sensory fusion range; PSF: Peak of Sensory Fusionability; All units above are the millimeters.

(a) Threshold is defined at 60% of sensory fusionability

(b) Threshold is defined at 40% of sensory fusionability

Fig. 5 The boundaries, the peaks and the sensory fusion areas of the sensory fusion range on curved surface recognition

Fig. 6 Seven patterns are sufficient to display the curved surface information, if the visual information is provided. The threshold of sensory fusionability is defined at 60%. This figure is replotted from Fig. 5(a)

Fig. 7 Four patterns are sufficient to display the curved surface information, if the visual information is provided. The threshold of sensory fusionability is defined at 40%. This figure is replotted from Fig. 5(b)

パターンが切り替えられ、各種の二次曲面を呈示することができる。図8に示されている触覚形状呈示装置の曲面ユニットは1本指の指先に曲面情報を呈示するために設計されているものであるが、このようなユニットはいくつかをつくらば多本指に曲面情報を呈示できると思われる。

5. 結 言

従来の研究では、平面呈示装置と多本の細い針先端による形状呈示装置が研究開発された。ところが、曲率が連続的に変化する触覚曲面呈示装置の製作は困難である。本研究では、人間の視触覚の融合特性に基づいて視覚情報の併用によって触覚形状呈示装置を簡略

Fig. 8 A tactile unit of sectional design of four tactile curved surface patterns (①~④) is carved on an acrylic columnar. It can be rotated to change the curved surface for presentation

化する方法を提案した。人間の視触覚特性に関しては、まず人間の曲面と平面を知覚する閾値を測定し、触覚曲面の直径が175 mmを超えると平面と曲面の判断が困難である結果は得られた。この結果より、触覚形状呈示装置を設計するときに、曲面の最大直径が曲面と平面の知覚閾値の近傍でこれより大きい値に設計すればよいことはわかった。つぎに、視触覚の融合特性を測定した。測定した結果を定量的に解析し、視覚情報を併用する触覚形状呈示装置を設計した。設計された触覚形状呈示装置は7個または4個の曲面パターンによって構成され、これらを用いてすべての曲面情報が呈示できると思われる。設計された触覚形状呈示装置の製作とその性能の実証は将来の課題である。

文 献

- (1) Wu, J.-L., Nakahata, M. and Kawamura, S., A New Head Mounted Display System with Adjustable Display for High Depth-Performance, *IEEE Int. Conf. Systems, Man Cybernetics*, 1 (1995), 298-303.
- (2) Wu, J.-L., Nakahata, M. and Kawamura, S., Measurement of Binocular Stereoacuity for Design of Head Mounted Display with Wide View, *IEEE Int. Conf. Systems, Man Cybernetics*, 2 (1996), 929-934.
- (3) 岩本和世・谷江和雄, 視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2 (1996), 4431-4432.
- (4) 服部桂, 人工現実感の世界, (1991), 229-231, 工業調査会出版.
- (5) 広田光一・斎藤淳・広瀬通孝, 局所面の提示の考え方にもとづく触覚呈示装置, 日本ロボット学会学術講演会, (1993), 355-356.
- (6) Künnapas, T. M., An Analysis of the Vertical-Horizontal Illusion, *J. Exp. Psychol.*, 49 (1955), 134-140.
- (7) Maheux, M., Townsend, C. and Gresock, C. J., Geometrical Factors in Illusion of Direction, *Amer. J. Psychol.*, 73 (1960), 535-543.
- (8) Bartley, S. H., The Perception of Size or Distance Based on Tactile and Kinesthetic Data, *J. Psychol.*, 36 (1953), 401-408.
- (9) Coren and Girgus, J. S., Visual Spatial Illusion: Many Explanations, *Science*, 179 (1973), 5034.
- (10) Gillam, Geometrical Illusions, *Scientific American*, 242-1 (1980), 86-95.
- (11) Brigell, M. and Uhlarik, J., The Relational Determination of Length Illusions and Length Aftereffects, *Perception*, 8 (1979), 187-197.
- (12) Wu, Jing-Long, Morita, S. and Kawamura, S., Human Sensory Fusion on Visual and Tactile Sensing for Virtual Reality, *IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, 2 (1996), 2365-2370.
- (13) 福井幸男・赤松幹之・下条誠, 視覚と触覚による形状認識の課題, 日本ロボット学会誌, 10 (1992), 49-53.