

基礎論文

手首圧迫による擬似力覚の提示

満田 隆^{*1}

Pseudo Force Display by the Use of Constrictive Pressure on a Wrist

Takashi Mitsuda^{*1}

Abstract – This study suggests a new force display system based on a perceptual illusion. The proposed display system will exert a pseudo force by placing pressure on the wrist of the operator. Air pressure will be used to generate this pseudo force sensation. The system is adequate as a wearable human interface because it is light, soft and safe. This paper discusses this system in which an operator can feel weight while manipulating virtual objects, and presents the experimental results of the haptic discrimination threshold test.

Keywords : force display, haptic interface, wearable system

1. はじめに

バーチャルリアリティに用いられる力覚提示装置の多くは、ロボットアームやワイヤ駆動システムなどのアクチュエータで、操作者が握るハンドルやペン等を動かすことで力覚を提示する[1]~[3]。これに対して、近年は、ブレーキや粘弾性可変要素などの受動要素によって操作者の運動を拘束することで反力として力覚を提示する方式が提案されている[4],[5]。受動的な力覚提示装置は、能動的な力覚提示装置に比べて暴走による危険性が小さく、小型軽量化しやすい利点がある。しかし、受動的な力覚提示装置は、その原理上、操作者に反力しか提示できない。たとえば、操作者が物体を把持して静止したときには、物体の重さ（重力）が操作者の手に作用しなければならないが、受動的な力覚提示装置では操作者が手を動かさない限り、物体の重量感を提示することはできない。

本研究では、この受動的力覚提示装置の欠点を補う手法として、錯覚を利用した新しい力覚提示ディスプレイを提案する。提案するシステムは空気圧で手首を圧迫することにより擬似的な力覚を提示する。図1に示すように、前腕の手首部分を圧迫すると、手に力が加わった状態と似た感覚が得られた筆者の経験から本手法を考案した。本手法では操作者が手を動かさない場合でも、擬似的に力覚を提示することができる。また、手首の圧迫により操作者の手は動かないため、受動的力覚提示と同じくシステム暴走時の危険性を伴わずに大きな力覚を安全に提示できる。また、手首の圧

迫装置は小型軽量であり、従来の受動的力覚提示装置との併用も可能である。

近年は、本論文で提案する手法のように錯覚を利用した力覚提示が注目されている。たとえば、雨宮らは、手で把持した装置を非対称な加速度で振動させることによって一方向の力覚を提示する手法を提案している[6]。また、南澤らは、指腹へ圧迫力とせん断力を与えることで、つかんだ物の重量を提示する指先装着型の触覚ディスプレイを提案している[7]。これらの研究は、シンプルな手法によるモバイル型の力覚提示装置の実現を目的としたものであり、手部への刺激による比較的小さな力覚の提示を対象としている。これに対して本研究は、受動的力覚提示装置との併用も念頭におきながら、手首の刺激による比較的大きな力覚の提示を対象としている点が他の研究と異なる特徴である。

以下、本論文では、まず手首圧迫による力覚提示装置を示し、手首圧迫によって提示できる力覚の弁別閾を実験結果により示す。つぎに、P C画面内で重量を感じながらバーチャル物体を操作できるシステムについて述べ、本システムで重量の異なる物体の判別実験を行った結果を示す。また、手首圧迫により知覚される重量の大きさを実験結果により示す。最後に、手首圧迫による力覚提示の特長と課題について述べる。

2. 実験

2.1 手首圧迫による力覚提示装置

本研究で開発した手首圧迫による力覚提示装置の構成図を図2に示す。操作者の手首に市販の血圧計（オムロン（株）、HEM-762ファジィ）のカフ（幅12 cm, 重量140g）を装着し、カフの内圧によって手首の圧迫力を調節する。図3にカフを手首に装着した様

*1: 立命館大学 情報理工学部

*1: Faculty of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

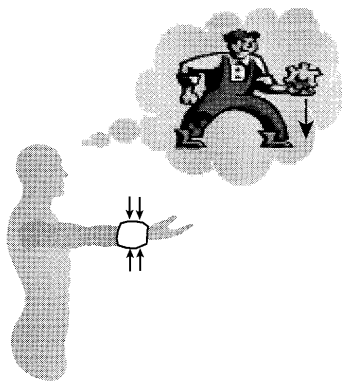


図1 手首圧迫による擬似力覚提示

Fig. 1 Pseudo force display by constrictive pressure on a wrist

子を示す。通常、血圧計のカフは上腕に固定するのに対して、本装置では、カフを前腕の手首部分に固定する。また、カフに圧力を加えないときには手首に圧迫力が加わらないように、カフは軽く皮膚と密着するように巻きつけて固定する。カフの内圧は、コンプレッサーに接続した空圧レギュレータ（CKD（株）、EV-2500）によってP Cからの信号で制御する。図4にカフの内圧を大気圧から5.0[kPa]に加圧したときの圧力変化と、5.0[kPa]から大気圧に減圧したときの圧力変化を示す。今回製作した装置では大気開放により減圧を行っているため、減圧に約1秒の時間を要しているが、真空ポンプと接続するなどの方法で高速化することも可能である。手首の位置は磁気式位置計測装置（Polhemus, FASTRAK）により計測し、バーチャル環境と手の位置をP Cディスプレイに表示する。

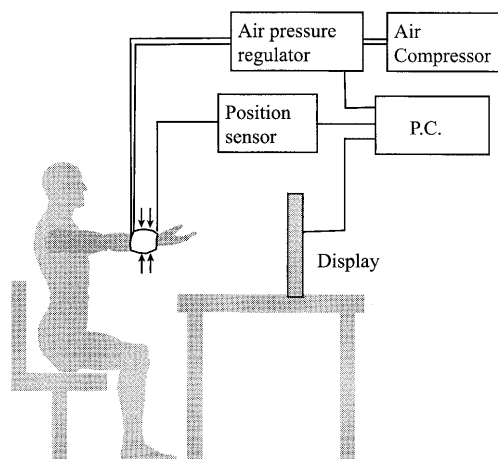


図2 擬似力覚提示装置の構成

Fig. 2 System configuration of pseudo force display

2.2 手首圧迫感の弁別閾

力覚提示装置の開発にあたり、手首圧迫力の設定指標を得ることを目的として、手首圧迫感の弁別閾を以



図3 手首に取り付けた血圧計用カフ

Fig. 3 Blood pressure cuff attached on a wrist

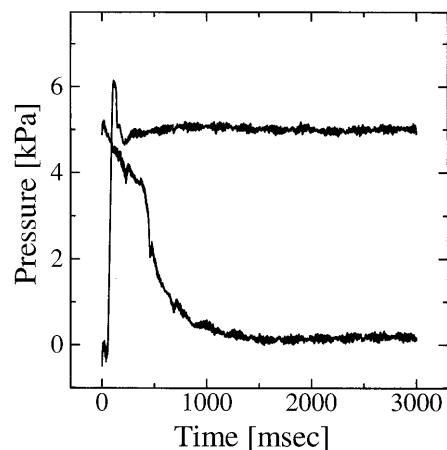


図4 気圧制御の応答時間

Fig. 4 Response time of pressure control

下の方法で簡易的に調べた。

被験者はカフを利き手に取り付けて椅子に座り、テーブルの上に利き手を置く。この状態でまず、カフに圧力Aをかけて、2～3秒後に圧力をBに変える。このとき、圧力Aまたは圧力Bのどちらかを基準圧力とし、他方を比較圧力とする。比較圧力の初期値は、基準圧力より0.1[kPa]大きい、または0.1[kPa]小さい圧力とする。被験者に圧力Aと圧力Bのどちらが大きいかを口頭で尋ね、違いが分からないか、間違えた場合には圧力差を0.1[kPa]刻みで大きくして実験を繰り返す。正答した場合には、同じ圧力差で実験を行い、2回連続で正答した時点での圧力差を弁別閾とした。この実験では、6種類の基準圧力（1.0[kPa], 2.0[kPa], 3.0[kPa], 4.0[kPa], 5.0[kPa], 6.0[kPa]）の下弁別閾と、3種類の基準圧力（2.0[kPa], 4.0[kPa], 6.0[kPa]）の上弁別閾を各1回ずつ計測した。弁別閾未満の圧力差に対しては「違いがわからない」と答えるケースがほとんどで、連続して誤答した試行は見られなかった。被験者は20代前半の男性10名で1名を除いて右利きである。

得られた上弁別閾と下弁別閾をそれぞれ図5と図6に示す。それぞれの図では各被験者の弁別閾と、全被験者の平均弁別閾を示している。すべての被験者において上弁別閾は下弁別閾よりも小さかった。また、弁別閾は被験者により大きく異なったが、全被験者の上弁別閾の平均と下弁別閾の平均はともに基準圧力に比例し、ウエーバーの法則[8]に一致した。

基準圧力と平均上弁別閾の関係、および2.0[kPa]から6.0[kPa]の基準圧力と下弁別閾の関係を最小二乗法により線形近似すると以下の関係式が得られた。

$$D_u = 0.03P + 0.1 \quad (1)$$

$$D_l = 0.049P + 0.21 \quad (2)$$

ここで P は基準圧力[kPa]、 D_u は上弁別閾[kPa]、 D_l は下弁別閾[kPa]である。今回の実験は、次節に示す力覚提示システムの圧力設定を行うために簡易的に行ったものであり、弁別閾の詳細を調べるためには、被験者数と試行回数を増やした実験による検証が必要である。

2.3 手首圧迫感による重量の異なる物体の判別

手首の圧迫感で重量の異なる物体をどの程度判別できるかを調べるため、PC画面内の2次元空間で重量を感じながらバーチャル物体を持ち上げて場所を移動できるバーチャルリアリティシステムを作成し実験を行った。図7に作成したバーチャルリアリティシステムの画面を示す。台の上に模様の異なるサイコロ状のバーチャル物体が複数配置され、手の位置は水平の横棒で表示されている。図7は、手で一つのバーチャル物体を持ち上げた状態を示している。手がバーチャル物体の下面から接触した時点で、物体重量に応じた強さで手首を圧迫して重量感を提示し、手の動きにあわせてバーチャル物体は上下左右に移動する。手が台の上面より下部に動いた時点で手首の圧迫を開放し、物体は台上に静止する。各物体の圧迫圧力は前節の実験で求めた下弁別閾(2)式を用いて以下の漸化式で設定した。

$$P_i = P_{i-1} + (0.049P_{i-1} + 0.21 + k) \quad (3)$$

ここで、 P_i は i 番目のバーチャル物体を持ったときに与えられる圧力で、 P_1 は1.0[kPa]とした。 k が小さくなるほど物体間の圧力差が小さくなり判別が難しくなる。本実験では物体移動に伴う慣性力は無視して、物体重量のみで圧力を制御した。

まず、 k を0.30, 0.21, 0.14の3種類設定し、1.0[kPa]から5.0[kPa]の圧力でそれぞれ7, 8, 9個の物体を提示して、前節と同じ被験者10人で各2回ずつ並べ替え実験を行った。その結果、全員が全試行とも重量順に正しく並べ替えることができたので、さらに難易度

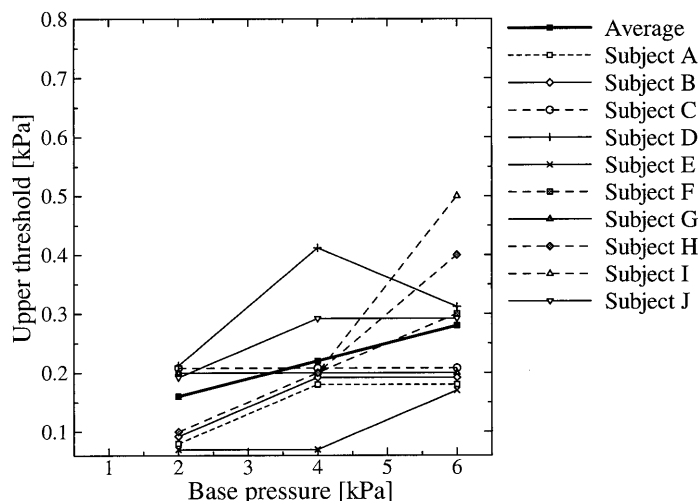


図5 手首圧迫感の上弁別閾

Fig. 5 Upper threshold of a sense of constrictive pressure on a wrist

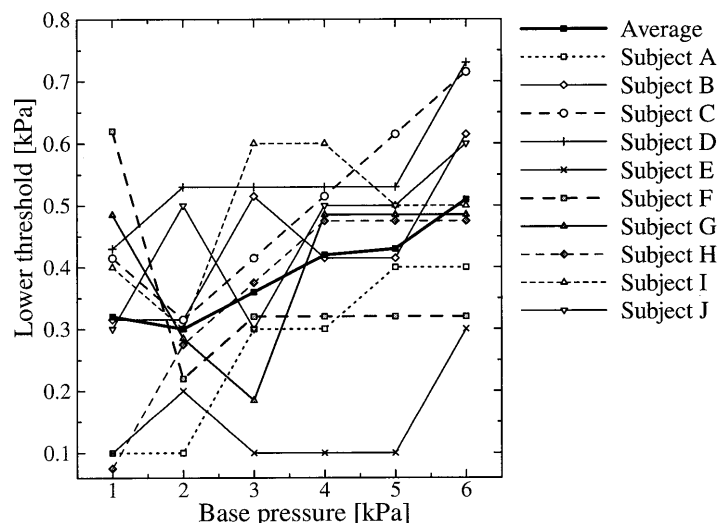


図6 手首圧迫感の下弁別閾

Fig. 6 Lower threshold of a sense of constrictive pressure on a wrist

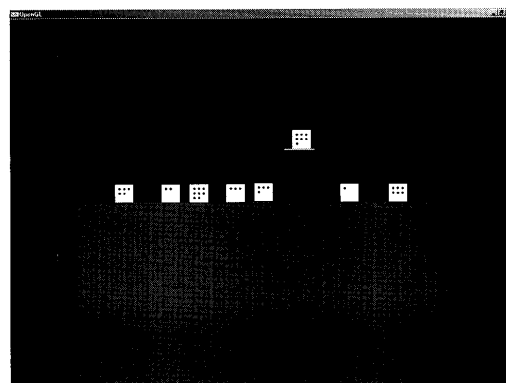


図7 バーチャル物体の操作

Fig. 7 Manipulation of virtual objects

の高い条件として、物体の個数を8個に固定し、 k を0.06, 0.0, -0.09の3種類設定して、先の被験者のうち7人に対して再度実験を行った。図8に各条件で設定した圧力をグラフで示す。この実験では物体の個数が8個であるため、圧力の最大値は、それぞれ3.6[kPa], 3.1[kPa], 2.4[kPa]となる。先の実験と同じように圧力最大値が5.0[kPa]になるまで物体の個数を増やすと、それぞれ14個, 16個, 18個の物体を提示できることになる。

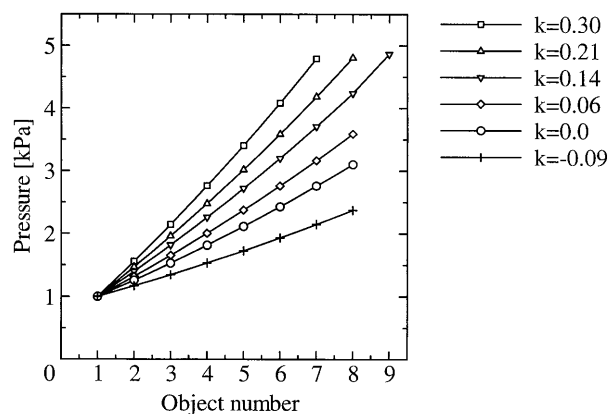


図8 圧力設定

Fig.8 Pressure configuration

各条件において2回ずつ実験した結果を表1に示す。表1(a)における丸印は正しい順序に並べられたことを示し、数字は間違えて並べられた物体の順序を示す。また、表1(b)~(d)は、識別結果を混同行列として k の設定値毎にまとめた結果を示す。各行列の i 行 j 列の要素は、 i 番目の物体を j 番目の物体として識別した回数の全被験者の合計を示している。混同行列からわかるように、誤識別と提示刺激の大きさには関係がとくに見られなかった。

また表1(a)から、前節の実験で求めた下弁別閾($k = 0.0$)よりも小さい圧力差($k = -0.09$)とした際に並び替えを間違えた試行数が増えていることがわかる。また、 $k = 0.06$ と $k = 0.0$ で並び替えミスがなかった被験者A,E,F,Gの下弁別閾(全基準刺激に対する平均弁別閾)が、それぞれ0.3, 0.2, 0.3, 0.4[kPa]であったのに対して、他の被験者(B,C,D)の下弁別閾はそれぞれ0.4, 0.5, 0.5[kPa]であり、並び替え実験の成績が良かった被験者のほうが平均下弁別閾は小さかった。各基準刺激における下弁別閾を2群で比較すると、3[kPa]と6[kPa]で1%水準の有意差(Mann-Whitney test)があった。

2.4 手首圧迫により知覚される重量感

手首圧迫により知覚される重量感の大きさを調べるために以下の実験を行った。被験者の右手首にカフを装着して、2.1節に示した装置で右手首を圧迫すると

表1 重量識別実験の結果

Table 1 Result of weight judgement test

(a) Result

	$k = 0.06$		$k = 0.0$		$k = -0.09$	
trial no.	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
sub.A	○	○	○	○	○	○
sub.B	○	○	12345687	○	○	○
sub.C	21435678	○	○	○	12346578	13245678
sub.D	12347568	○	○	13245678	12435678	12346587
sub.E	○	○	○	○	○	12346758
sub.F	○	○	○	○	○	12346578
sub.G	○	○	○	○	○	○

(b) Confusion matrix ($k = 0.06$)

		Judgement							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Stimulus	1	13	1						
	2	1	13						
	3			13	1				
	4			1	13				
	5					13		1	
	6					1	13		
	7						1	13	
	8								14

(c) Confusion matrix ($k = 0.0$)

		Judgement							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Stimulus	1	14							
	2		13	1					
	3		1	13					
	4				14				
	5					14			
	6						14		
	7							13	1
	8							1	13

(d) Confusion matrix ($k = -0.09$)

		Judgement							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Stimulus	1	14							
	2		13	1					
	3		1	12	1				
	4			1	13				
	5					10	4		
	6					3	10	1	
	7					1		12	1
	8							1	13

同時に、左手首に重りが入った箱を吊り下げて、左手と右手の重量感覚を比較してもらった(図9)。左右の皮膚への接触感が同じになるよう重りの箱は柔軟な布製リングによって吊り下げ、リングの幅はカフと同じ12cmとした。また、重りには1個あたりの平均質量0.7[g]の小石を用いた。実験者は、被験者にどちらが重いかを口頭で尋ねながら、小石の量を手作業で増減し、左右の感覚が同じになったと被験者が答えた時

満田：手首圧迫による擬似力覚の提示

点で重りの重量(箱と布製リングを含む)を計測した。被験者が左右の感覚が等しいと答えるまでの圧迫開始からの時間は平均約 20 秒で、その間、右手首は一定の力で圧迫し続けた。また、試行毎にカフの圧力を大気圧に下げて圧迫力を取り除いた。実験中、被験者には目を閉じてもらい、手首の感覚のみで比較をしてもらった。

まず 3 種類の圧迫力 (2.0[kPa], 4.0[kPa], 6.0[kPa]) に対して各 3 回ずつ計測した。また、左手と右手の感覚の違いによる影響を確認するために、両手に重りが入る箱を吊り下げ、右手に 250[g], 500[g], 625[g] の 3 種類の重りを吊るしたときに同じ感覚が得られる左手の重りの重量を各 2 回ずつ計測した。被験者は 20 代前半の男性 5 名である。被験者は全員右利きであった。

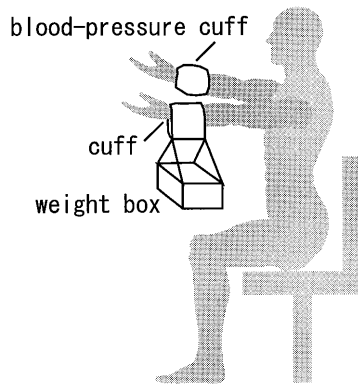


図 9 重量感評価実験
Fig. 9 Weight perception test

まず両手に重りを吊るしたときに、同じ重量感が得られた左手の重量を図 10 に示す。図には各被験者の 2 回の計測の平均と全被験者の平均を示している。また、図中の直線は両手の重量が等しい場合を示している。各刺激重量において各被験者が知覚した重量感の標準偏差の平均は 49[g] であった。右手と左手の重量感には大きな差は無いことがわかる。

つぎに、カフで右手首を圧迫したときに知覚された重量を図 11 に示す。図には各被験者の 3 回の計測の平均と全被験者の平均を示している。各圧迫力において各被験者が知覚した重量の標準偏差の平均は 59[g] であった。いずれの被験者もカフ圧力に比例する重量を知覚していることがわかる。

また、知覚された重量の全被験者の平均を最小二乗法で直線近似すると、直線の切片(圧迫圧力が 0.0[kPa] における重量感)は、120[g] であった。これはカフの重量 (140[g]) に相当すると考えられる。

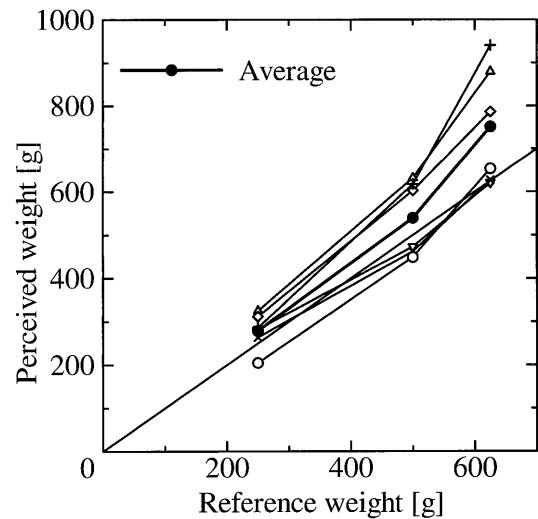


図 10 重量感の左右差
Fig. 10 Laterality of weight perception

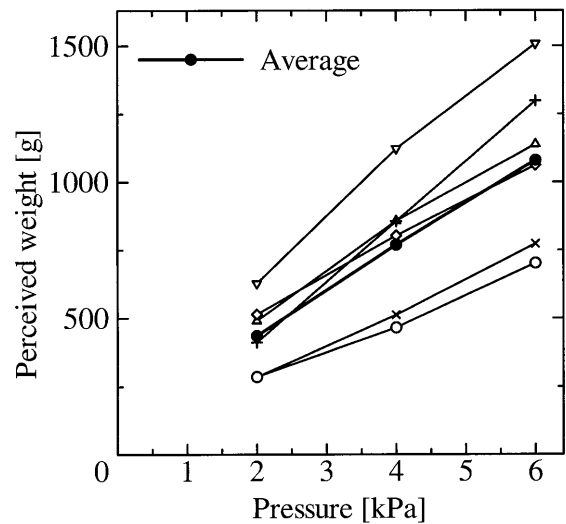


図 11 手首圧迫により知覚された重量
Fig. 11 Weight perceived by constrictive pressure on a wrist

3. 手首圧迫による力覚提示の特長と課題

本節では、手首圧迫による力覚提示の特長と課題を上述した実験に対する考察を交えながら説明する。

手首圧迫による力覚提示の最大の特長は、操作者の手に直接的な力を与えずに力覚を提示するため、大きな力を安全に提示できることである。一方、手首圧迫による力覚提示の短所は、提示される力覚が擬似的な力覚であり、実環境で得られる感覚とは異なる点にある。たとえば、物体を手で押す感覚には、手のひらの圧覚、指の触覚、前腕と上腕の筋受容器からの感覚、さらには他の全身の受容器からの感覚が含まれる。そして、これらの感覚は、操作者が物体を押す姿勢や各関節の力の掛け具合によって変化する。1 節で述べた

能動的な力覚提示装置と受動的な力覚提示装置は、いずれも操作物体と操作者の間に作用する力を生成するので、物体の動きを正確に模擬することができれば、操作者の動きに関わらず、実環境と同じ感覚を操作者に知覚させることができる。これに対して、手首の圧迫による力覚提示は、前腕の筋と皮膚の受容器だけに刺激を与えているので、実環境で得られる感覚とは異なる。

実際に 2.4 節の実験において一部の被験者は、左右の感覚が異なるので正確に比較することは難しいとコメントした。本実験において右手首は圧迫されるだけで実際に下向きの力を受けているわけではないので、被験者は重量感が等しくなるように調節したのではなく、手首の圧迫感が等しくなるように調節したとも考えられる。一方、2.3 節の並べ替え実験では、提示された知覚と重量感との違いに関するコメントは一切なかった。主観的な評価にすぎないが、手首圧迫により生じる擬似的な力覚は、操作者が環境との相互作用を視覚的に知覚している場合に、より強く生じるようである。視覚情報が重量感に及ぼす影響については古くから研究されており、重量感が視覚的な物体の大きさに依存して変化するシャルパンティエ効果などが知られている。このように、重量感は視覚情報の強い影響を受けることから、視覚情報が手首圧迫による重量感の知覚生成に関与していると考えられる。

つぎに、手首圧迫により生じる錯覚の原理について説明する。2.4 節の実験において、一部の被験者は重量感を調べるために手を上下に小さく動かす動作を行った。重量感の知覚には遠心性信号と求心性信号の両方が関与すると推定されており、手の上下運動はこれらの信号をより正確に同定するのに役立っていると考えられる [8]。本実験では物体の慣性力を無視しているため、手を上下に運動させても圧迫力に変化は生じない。しかし、手首が圧迫された状態では運動に要する筋収縮力が変化すると考えられるので、手首圧迫が手の運動による重量感の知覚生成に寄与している可能性がある。また、筋の剛性制御が重量感の知覚に関与すると報告されている [9] ことから、手首圧迫による筋剛性の変化が重量感の錯覚を生じさせている可能性もある。以上述べた手首圧迫による重量感の知覚原理はすべて仮説であるため、その検証は今後の課題である。

つぎに、手首圧迫による力覚提示の課題について述べる。手首圧迫により提示される感覚を実際の感覚に近づける方法としては、手のひらに圧覚を与えたり、上腕を圧迫するなど、実環境で感覚が生じる他の部位を同時に刺激する方法が考えられる。しかし、この場合には各部位に生じる感覚を正確に推定する必要がある。また、他の方法として、受動要素を用いた力覚提

示と組み合わせて用いることが考えられる。この場合には、受動要素により提示する力と手首圧迫により提示する感覚を組み合わせる方法の検討が必要となる。いずれの方法も、安全性を保ちながら提示する感覚を実感覚に近づけることができるが、装置と制御法が複雑化する可能性もある。力覚提示の用途によっては、たとえ擬似的な感覚であっても、その感覚を用いることで作業性が向上すれば良い場合もあることから、手首圧迫による力覚提示はその小型軽量性が活きる実用的な用途に利用価値が大きいと考えている。

つぎに手首圧迫による力覚提示の実用化課題について述べる。本節で示した実験では、手首の圧迫圧力の最大値を 5.0[kPa] とした場合に判別可能な物体個数を調べた。さらに大きな圧力を加えることで、提示できる力の範囲を広げることができると考えられる。しかし、圧迫力が大きくなりすぎると、手首の圧迫により血流が阻害されて感覚が変化するため、圧迫時間を考慮して最大圧力値を設定する必要がある。また、圧迫場所の最適化や圧迫方法の変更によっても被験者間の知覚差や血流阻害の影響も変化すると考えられる。これらの検討は今後の課題としたい。また他に、圧迫力制御装置の改良による制御の高速化と小型化が課題として挙げられる。

4. おわりに

本論文は、手首を圧迫することで手部に外力が働いたような擬似的な力覚を提示する手法を提案した。また、手首圧迫による力覚提示装置を開発し、実験により手首圧迫感の弁別閾がウエーバーの法則にあてはまることを示した。さらに、バーチャル空間において重量を感じながら物体を操作できるシステムを開発し、手首圧迫によって重量の異なる物体の判別が行えることを実験により示した。また、手首圧迫によって知覚される重量感の大きさを実験により示した。

本論文で提案した手法は、手首以外の部位にも適用できると考えられる。足首の圧迫により足部への力覚を提示するなど、他の身体部位への力覚提示は今後の研究の展開として興味深い課題である。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金 (19700121) の助成を受けたものである。実験装置の開発と実験実施に助力をいただいた立命館大学大学院理工学研究科松尾憲親氏に感謝する。

参考文献

- [1] H.Iwata: "Artificial Reality with Force-Feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator", Computer Graph-

満田：手首圧迫による擬似力覚の提示

- ics, Proc.ACM SIGGRAPH, Vol.24, No.4, pp.165-170(1990)
- [2] 佐藤 誠, 平田 幸広, 河原 田弘, "空間インタフェース装置 SPIDAR の提案", 電子情報通信学会論文誌 D-II, J74-D-II, No.7, pp.887-894(1991)
 - [3] 森園 哲也, 井田 瑞人, 和田 隆広, 呉 景龍, 川村 貞夫, "パラレルワイヤ駆動システムによるバーチャルテニスの試み", 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.1, pp.153-161(1997)
 - [4] J.Furusho, M.Sakaguchi, N.Takesue, K.Koyanagi: "Development of ER Brake and its Application to Passive Force Display", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.13, No.7/8, pp.425-430(2002)
 - [5] 満田 隆, 久下 幸子, 若林 将人, 川村 貞夫, "粒子内蔵型機械拘束要素の開発と身体装着型力覚呈示装置への応用", 計測自動制御学会論文集, Vol.37, No.12, pp.1134-1139(2001)
 - [6] 雨宮 智浩, 安藤 英由樹, 前田 太郎, "知覚の非線形性を利用した非接地型力覚惹起手法の提案と評価", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.1, pp.47-57(2006)
 - [7] 南澤 孝太, 川上 直樹, 館 , "質量感覚を提示する指先装着型触覚ディスプレイ", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 講演論文集, 2P1-N06(2007)
 - [8] 知覚心理学の基礎, 培風館 pp.6-7(2000)
 - [9] Y.Koike, J.Kim, S.Duk: "Role of Stiffness in Weight Perception", Japanese Psychological Research, Vol.48, No.3, pp.174-187(2006)

(2007 年 3 月 30 日受付)

[著者紹介]

満田 隆 (正会員)



1998 年大阪大学大学院基礎工学研究科修了。同年ローマ大学人間生理学研究
所 P D, 2000 年立命館大学理工学研究
機構 P D, 01 年岡山大学医学部助手, 03
年立命館大学理工学部助教授, 04 年同大
学情報理工学部助教授, 現在に至る。ソ
フトメカニズム, 脳機能解析などの研究
に従事 (博士 (工学))。