

テクスチャ触感認知における撫でる方向の影響 ～布地を対象とした検討～

山崎 陽一* 藤原 大志 長田 典子（関西学院大学）

Influence of Stroking Direction for Tactile Perception regarding Material Surfaces -Case study of Fabrics-

Yoichi Yamazaki*, Taishi Fujiwara, Noriko Nagata, (Kwansei Gakuin University)

Tactile perception is constructed by touching a material freely with hands. However, various types of touch exist, and we need to clarify the relationship between touch and tactile perception regarding tactile quantification. To clarify the relationship, we studied the relationship between the texture perception and the finger vibration, which is occurred when stroking the fabric surface. As the results, we found that the relationship between vibration and tactile perception by stroking toward the fingertip differs from the relationship when stroking toward other directions.

キーワード：触感，アクティブタッチ，皮膚振動，触感定量化
(Tactile perception, Active touch, Cutaneous vibration, Tactile quantification)

1. はじめに

感性工学は，感性の働きに注目することで新たな価値をつくり，価値を交換することによって，産業・経済・文化の発展を支える科学技術⁽¹⁾である。モノや設計パラメータにおける物理要因と、それらが喚起する感性的反応（価値、感情、印象など）を計測し，得られた感性量を真値（grand truth）として物理量との関係をモデル化することによって，物理要因により喚起される価値や印象を定量化・可視化し，逆に価値や印象をもたらす物理要因を求める技術である。感性工学分野のこれまでの研究が視覚，聴覚中心であったのに対し^{(2)～(5)}，近年，触覚に関わる感性価値への期待が急速に高まっている。

触感とは，自らが手指を能動的に動かすことで対象物と接触し，この接触により生じる皮膚の相対的な変形等から刺激，手指の運動に関する情報，触れた意図に関する情報などを統合する高次な情報処理過程を経て感じる主観的な感性量である。触感の定量化においては，その形成に関わる認知メカニズムを把握することが重要である。そのため様々な取り組みが行われている。厳密に触れ方を統制する観点からは，撫でる動作を模倣する機械を作成し，接触子により対象物を撫でた際に生じる物理量と物理量の関係から触感認知メカニズムの検討が行われている^{(6)～(9)}。一方で，ヒトが対象物を撫でた際に生じる物理量を重視した取り組みも報告されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。更に，これらの取り組みにより解明された触感認知メカニズムの応用を企図した取り組みとし

て，表面性状や弾性特性といった評価対象物の物性から，触感認知に関わる物理量と親和性の高い特徴量を導く試みも報告されている^{(12)～(14)}。このように定量化に関してはメカニズムの解明から応用まで幅広い取り組みが行われているが，基本的に定量化の取り組みにおいて触れ方の要因は定数的に取り扱われてきた。

Lederman 等は，触れ方と触感の関係に言及し，触れ方のカテゴリ化と，触れることにより確認する触覚情報（硬さ，温度，体積，形状，重さ，テクスチャ等）の性質に応じて異なる触れ方をすることを報告した⁽¹⁵⁾。この研究で示唆される触れ方と触感との密接な関係は多くの研究により支持され，これまでに触れ方と触感との関係について多くの知見が蓄積されてきている。この研究の進展に伴い，触れ方と触感の間に横たわる複雑な触感認知メカニズムの存在が示唆されているが，その解明にまではいたっていない⁽¹⁶⁾。

一方で，精密な触感の定量化の実現においてはこのメカニズムの解明が必要である。ここで指の解剖学的構造と触れ方の関係について検討する。指は爪，表皮，真皮，皮下脂肪，骨などの複数の組織から形成されており，その解剖学的構造は触感の形成に影響することが報告されている⁽¹⁷⁾。そして，指の構造は基本的に等方的ではないことを考えると，撫でる方向が異なると皮膚に生じる振動は異なると予測される。触れ方が統制された条件において導かれた振動と触感の関係を表す定量化モデルに基づくのであれば，振動の特徴が異なるのであれば撫でる方向毎に得られる触感が異なるはずである。その一方で，我々はロバストに対象物の触

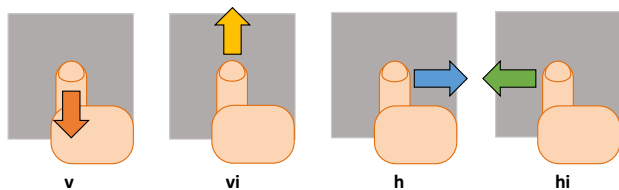


図1 サンプルに対する4種類の撫で方
Fig. 1. Four types of stroking for the sample



図2 実験刺激
Fig. 2. Experimental stimuli

感を得ている点を考慮すると、前述の統制した定量化モデルによる解釈は限定的であり、我々が実際に獲得している豊かな触感を十分に説明できない可能性が考えられる。しかしながら、この議論に必要となる、撫でる方向が触感に影響するかといった点については明らかにされていない。

そこで本研究では、将来的な触れ方まで考慮した精緻なテクスチャ触感の定量化を目指し、撫でる方向が触感認知に及ぼす影響を、主観評価によって得られる主観的な触感と、触感形成の一次情報である対象物を撫でた際に指に生

表1 評価項目一覧

Table 1. List of evaluation words

Sensory cluster	Evaluation words	
C1: 視覚	光沢のない	— 光沢のある
	目立つ	— 目立たない
	丈夫な	— 華奢な
C2: フルモーダル	汚い	— 綺麗な
	快適な	— 不快な
C3: 視・触覚	均一な	— 不均一な
	柔らかい	— 硬い
	すべすべした	— ざらざらした
C4: 聴覚	強い	— 弱い
	陽気な	— 陰気な
	不安な	— 安心な
C5: マルチモーダル	個性的な	— 平凡な
	暖かい	— 冷たい
	人工的な	— 自然な
C6: 触覚	高級感のある	— 安っぽい
	粘ついた	— 乾いた
	弾力のある	— 弾力のない
	馴染む	— 馴染まない

じる振動の両面から検討する。

2. 主観評価及び振動計測実験

本章では、図1に示した4種類の撫で方により得られる主観的な触感と指に生じた振動情報を取得するための、主観評価及び振動計測実験について示す。

〈2・1〉 参加者 大学生及び大学院生計10名（男性6名、女性4名、平均年齢22.8歳±1.7歳）が参加した。いずれの参加者も健康状態は良好で右手を利き手としていた。参加者は個室内で実験の内容について説明を受けた後に実験に参加することに同意した上で、同意書に署名した。また、この実験は関西学院大学人を対象とする行動学系研究倫理に則り実施した。研究協力者は自由意志での参加であり、事前に実験責任者から口頭及び書面で本研究の目的、内容および参加者の権利を十分に説明し、書面にて参加の同意を得ている。

〈2・2〉 実験刺激 実験では、質感サンプルセット（竹井機械工業株式会社）⁽¹⁸⁾から、8号帆布（Sailcloth）、平デニム（Denim）、綿麻（Cotton linen）、ガーゼ（Gauze）、タオル（Towel）、フェルト（Felt）、フリース（Fleece）、スウェット（Sweat）、ビロード（Velvet）、シルク（Silk）の10種に、異方性を考慮し撫でる方向を変えた3種を加えた計13種の布を用いた（図2）。各サンプルは、10×10 [cm]の成形された金属板に貼り付けられている。

〈2・3〉 評価項目 実験に先立ち、先行研究から布等

表 2 二元配置分散分析結果

Table 2. Table of the results for two-way ANOVA

Evaluation words			Sample		Stroke direction		Interaction	
			<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
快適な	—	不快な	18.50	.00**	1.16	.34	1.12	.33
均一な	—	不均一な	25.80	.00**	3.83	.02*	1.86	.10
柔らかい	—	硬い	17.20	.00**	1.59	.21	1.11	.37
すべすべした	—	ざらざらした	38.46	.00**	.66	.58	1.89	.10
個性的な	—	平凡な	3.17	.03*	.75	.51	1.02	.43
暖かい	—	冷たい	11.37	.00**	.74	.54	1.47	.19
人工的な	—	自然な	3.10	.05*	1.55	.23	.94	.48
高級感のある	—	安っぽい	36.00	.00**	1.38	.27	1.23	.30
粘ついた	—	乾いた	5.17	.00**	1.38	.27	.90	.47
弾力のある	—	弾力のない	4.70	.00**	.50	.69	2.13	.05
馴染む	—	馴染まない	8.92	.00**	1.26	.31	1.06	.40

から感じる感性的質感を表現する合計 81 語の評価語対を収集し、MD (Modality Differential) 法⁽¹⁹⁾による評価実験により、各評価語対と関係が強い感覚モダリティの観点から評価語対を分類した。この結果、C1:視覚、C2:フルモーダル、C3:視・触覚、C4:聴覚、C5:マルチモーダル、C6:触覚、の 6 つの感覚クラスを代表する 18 の評価語対を抽出した (表 1)。本研究では、触覚と関係する C2:フルモーダル、C3:視・触覚、C5:マルチモーダル、C6:触覚、の感覚クラスに属する 11 評価語対を分析に用いた。

〈2・4〉 実験環境 実験は照明環境が統制された防音室において、参加者と実験者が実験刺激を提示する机越しに対面した状況で着座した上で実施した。なお、実験中は参加者が実験刺激を視認できないようにするため、参加者と実験刺激の間をカーテンで仕切った。

〈2・5〉 振動量計測 テクスチャ触感を形成する主要な物理量である皮膚の振動を、Haplog (カトーテック社製)⁽²⁰⁾を用い計測した。Haplog は、指腹の変形をひずみゲージを内蔵したセンサにより捉えることで、指に加わる力の経時的変化の計測が可能である。本研究では、この指に加わる力の時間的な変動を振動として計測し分析する。なお、皮膚内に存在する主要な 4 つの触覚受容器の応答周波数特性は大凡 200 [Hz]までの帯域であることから、サンプリング定理により 400 [Hz]以上のサンプリングであれば触感の形成に関わる主要な情報を取得できると考えられる。この観点からサンプリング周波数を 1000 [Hz]と設定した。

〈2・6〉 撫で方 実験参加者は、テーブルの上に提示された実験刺激を利き手の人指し指を用いて、実験者から指定された方向に最も心地よい撫で方で指を動かし実験刺激を撫でる。実験者から提示される撫で方は、図 1 の 4 種類で、上から下に向かって撫でる場合 (v)、下から上に向かっ

て撫でる場合 (v)、左から右に向かって撫でる場合 (h)、右から左に向かって撫でる場合 (hi)、の 4 種類である。

〈2・7〉 手続き 実験参加者は、サンプルを撫でた際に生じる振動の計測と主観評価を、52 試行 (13 サンプル×4 方向) 行った。また、順序効果の影響を考慮し、提示する実験刺激と指示する撫で方の順番は参加者毎にランダムにした。各試行において、参加者は最初に提示された実験刺激について指示された撫で方向で最も心地良い撫で方を探索した。その後、振動計測のために探索により発見した最も心地良い撫で方で実験サンプルを 10 回撫でた。最後に最も心地良い撫で方で実験刺激を撫でつつ、表 1 の評価語対について 7 段階の SD 法により評価を行った。なお、評価における順序効果の影響を考慮し評価語対の極性及び評価項目の並びは参加者毎にランダムに変更した。

3. 結果と考察

〈3・1〉 撫でる方向と主観的な触感の関係 主観評価実験の結果に基づき、撫でる方向が主観的な触感の形成に影響を及ぼすのかを検討した。この分析は、触覚と関係が強い C2:フルモーダル、C3:視・触覚、C5:マルチモーダル、C6:触覚、に属する、快適な-不快な、均一な-不均一な、柔らかい-硬い、すべすべした-ざらざらした、個性的な-平凡な、暖かい-冷たい、人工的な-自然な、高級感のある-安っぽい、粘ついた-乾いた、弾力のある-弾力のない、馴染む-馴染まない、の 11 評価語対の結果を対象とする。

最初に、これらの評価語対について主観評価実験によって得られた 10 人分の評価データに対して、7 段階の評価尺度を 0～6 点で点数化した。その後、実験サンプルと撫で方

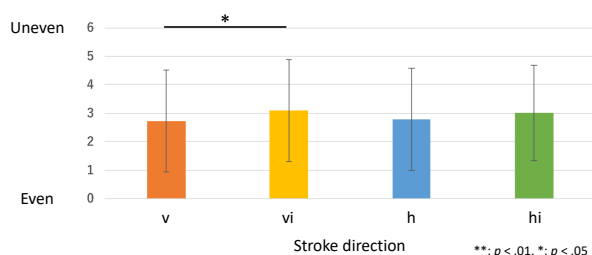


図3 多重比較結果（均一な-不均一な）

Fig. 3. Result for Multiple comparison (even – uneven)

向を要因とする二元配置分散分析を実施し、その結果を表2に示した。まず、実験サンプルの要因については、全ての評価語対について主効果 ($p < .05$) が認められた。これは実験サンプルに幅広い触感を提供する布地を用いており、これを採用した評価語対により捉えられていることを確認できた。この上で、撫で方向の要因に着目すると、「均一な-不均一な」を除いた10種の評価語対で主効果が認められず、基本的に撫でる方向は主観的な触感評価に影響しないことが分かった。

一方で、主効果が認められた「均一な-不均一な」について多重比較による検定を実施し、上から下に向かって撫でる場合(v)と下から上に撫でる場合(vi)の間で有意差 ($p < .05$) が認められ、下から上に撫でた場合、より強く不均一であると感じていることが分かった(図3)。ただし、その差異は0.35と小さく、撫でる方向が主観的な触感評価に及ぼす影響は小さいといえる。

〈3・2〉 撫でる方向と指に生じる振動の関係 まず、テクスチャ触感の形成に影響する振動情報として、coif5基底の離散ウェーブレット解析により約10 [Hz] より高い周波数成分を選択的に抽出した。この抽出された高周波数成分のデータに対して、Welch法(窓幅0.5[s]、重複率0.5)を適用し、パワースペクトル密度を推定した。その後、撫でる方向毎にパワースペクトル密度の平均値と標準偏差を計算し、結果を図4に示した。図中の実線は平均値、破線は標準偏差を表している。また、60 [Hz] と120 [Hz] に確認されるピークは、ひずみゲージに混入した商用電源由来のノイズであり、本論文における検討はこのピーク以外の成分について行う。

撫でる方向に関わらず共通した傾向として、周波数が高くなるのに伴いパワーは減衰する。その一方で、50～250 [Hz] の周波数帯域において撫でる方向毎の特徴の差異が大きいことが分かる。下から上に向かって撫でる場合(vi)が最も強い振動を生じ、次に強い振動を生じるのが下から上に向かって撫でる場合(v)で、その次は左から右(h)と右から

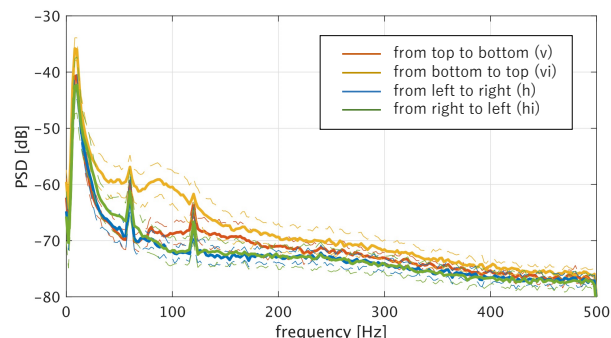


図4 撫でる方向毎のパワースペクトル密度

Fig. 4. Power spectrum density for each stroke direction.

左(hi)であることが分かる。また標準偏差に着目すると全体的に2 [dB] 程度であることが分かる。下から上に撫でる場合(vi)は、他の撫でる場合に対して、標準偏差よりも明らかに大きな差異が生じていることから指に生じる振動は撫でる方向の影響を受けることが分かる。

この結果は、指の解剖学的構造からも妥当であるといえる。指の解剖学的構造を上下方向についてみた場合、非対称な構造を有しており、vとviで振動特性が異なることは妥当であると考えられる。また、上下方向に対して、左右方向の構造は対照的でありhとhiで似た振動特性が得られたことも妥当であると考えられる。

〈3・3〉 振動情報を調整する撫で方と対応した物理量

指に生じる振動は撫でる方向の影響を受ける一方で、主観的な触感は撫でる方向の影響が殆ど認められなかったことから、テクスチャ触感の形成においては、振動情報を撫で方により調整するメカニズムが存在することが示唆される。ここで疑問となるのが、撫で方と対応するどの物理量が振動情報の調整に寄与しているかといった点である。これを明らかにするため、主観的な触感として唯一撫でる方向の影響が認められた「均一な-不均一な」に着目した。

「均一な-不均一な」は、材質感次元においてはマクロ粗さに対応付けられる。このマクロ粗さは、テクスチャの表面波長が数百 μm ～1mm前後の比較的大きな構造と対応した粗さであり、メルケル細胞の活動の空間分布から形成されることが神経科学的観点から指摘されている⁽²¹⁾。この性質を考慮すると、「均一な-不均一な」は、スタティックな圧力の分布に関する物理量がその形成に強く影響したと考えられる。すなわち、スタティックな圧力分布の形成に関わる押込み力に基づき振動情報が調整された可能性が考えられる。

これを検証するため、計測した力の経時変化から、撫でている間の押込み力に関する特徴量を抽出し、撫で方との関係を検討した。手続きとしては、1試行の力の経時変化を

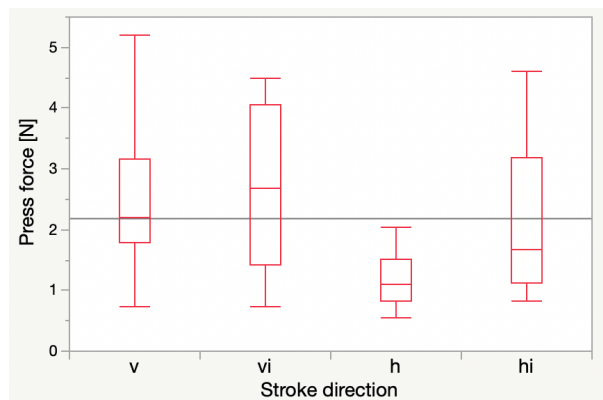


図5 撫でる方向毎の押込み力

Fig. 5. Press force for each stroke direction.

記録したデータから90パーセンタイル以上の力が加わったデータを抽出し、その平均値を押込み力の特徴量として算出した。この押込み力を、撫でる方向毎に集計し箱ひげグラフとして図5に示した。全体的に2[N]程度での押込み力で触れていることが分かる。また、分散分析を行ったところ撫でる方向の間での主効果は認められなかった ($F = 2.03$, $p = .13$)が、 p 値は比較的小さく、傾向として下から上に向かって撫でる場合(vi)が最も押込み力が強く、上から下(v)、右から左(hi)、左から右(h)の順番に押込み力が小さくなる。この傾向は、撫でる方向と押込み力が関係することをお示す結果であり、押込み力による振動情報を調整の可能性を支持する結果である。

4. まとめ

本研究では、テクスチャ触感の定量化における撫で方の影響を明らかにするため、撫でる方向が触感に及ぼす影響を、主観的な触感と指に生じる振動の両面について検討した。結果、主観的な触感については、マクロ粗さを表す「均一-不均一」を除いて、撫でる方向がその評価に影響しないことが分かった。一方、指に生じた振動は、下から上に向かって撫でた場合に周波数特性が他の撫でる方向と異なり、撫でる方向の影響を受けることが分かった。また、撫でる方向に対する押込み力の関係についても検討し、主効果は認められなかったが撫で方により押込み力が変化する傾向が確認できた。これらの結果から、テクスチャ触感、撫でる方向の違いと対応した押込み力による振動情報の調整を経て形成されることが示唆された。今後は、精緻なテクスチャ触感の定量化の実現を目指し、振動情報と押込み力の定量的な関係解析に取り組む。

謝辞

本研究の一部は、COI STREAM「感性与デジタル製造を直結し、生活者の創造性を拡張するファブ地球社会創造拠点」、JSPS 科研費 21K12659 によった。

文 献

- (1) 日本学術会議：「人間と工学研究連絡委員会感性工学専門委員会報告 現代社会における感性工学の役割」, 第 1033 回運営審議会 (2005)
- (2) 柳澤秀吉・村上存・大富浩一・穂坂倫佳：「感性の多様性を考慮した感性品質の定量化手法(製品音の設計における感性品質の定量化への適用)」, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.74, No.746, pp.2607-2616 (2008)
- (3) 谿 雄祐・藤原大志・竹本 敦・飛谷謙介・井村誠孝・長田典子：「テクスチャの印象における視触覚情報統合様式に関する検討」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.23, No. 3, pp.115-118 (2018)
- (4) 飛谷謙介・松本達也・谿 雄祐・藤井宏樹・長田典子：「素肌の質感表現における印象と物理特性の関係性」, 映像情報メディア学会誌, Vol.71, No. 11, pp.259-268 (2017)
- (5) 飛谷謙介・水嶋彬貴・長田典子：「Multi-band BTDF モデルによる織物の蛍光特性の表現」, 精密工学会誌, Vol.80, No. 12, pp.1213-1218 (2014)
- (6) 川端季雄：「KES-F システムとその応用」, 繊維と工業, Vol.6, No.3 pp.210-217 (1991)
- (7) 田中由浩・田中真美・長南征二：「手触り感計測用センサシステムを用いた触覚感性計測」, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.73, No. 727, pp.169-179 (2007)
- (8) K. Kuramitsu, T. Nomura, S. Nomura, T. Maeno and Y. Nonomura : "Friction evaluation system with a human finger model", Chemistry Letters, Vol.42, No.3, pp. 284-285 (2013)
- (9) K. Kikigawa, R. Kuhara, J. Kwon, M. Sakamoto, R. Tsuchiya, N. Nagatani and Y. Nonomura: "Physical origin of a complicated tactile sensation: 'shittori feel'", Royal Society Open Science, Vol.6, No.7, 190039 (2019)
- (10) 白土寛和・野々村美宗・前野隆司：「肌質感を呈する人工皮膚の開発(皮膚の表面凹凸パターンと弾性構造の模倣に基づく肌質感の実現と評価)」, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.73, No.726, pp.541-546 (2007)
- (11) 山崎陽一・飛谷謙介・谿 雄祐・井村誠孝・亀井光仁・長田典子：「感性工学的手法に基づく触感予測モデルの構築と評価-布地触感予測の実現-」, 電気学会論文誌C, Vol.142, No. 5, pp.616-624 (2022)
- (12) M. Nakatani, M. Imura, Y. Yamazaki, T. Okazaki, Y. Asano, R. Nakamura, N. Nagata and H. Tanaka : "A 3D-printed haptic material library for quantifying the force-displacement relationship", Proc. 2021 IEEE World Haptics Conference (WHC), 585 (2021)
- (13) M. Imura, Y. Yamazaki, M. Nakatani, T. Okazaki, R. Uesaki, N. Nagata and H. Tanaka : "Feature quantification of material softness perception using the force-displacement relationship", Proc. 2021 IEEE World Haptics Conference (WHC), 1139 (2021)
- (14) Y. Yamazaki, M. Imura, M. Nakatani, S. Osanai, N. Nagata and H. Tanaka: "Feature quantification of material texture perception using a force-displacement relationship", Proc. 2021 IEEE World Haptics Conference (WHC), 1157 (2021)
- (15) S. J. Lederman and R. L. Klatzky: "Hand movements: a window into haptic object recognition", Cognitive Psychology, Vol.19, No.3, pp.342-368 (1987)
- (16) 横坂拓巳・渡邊淳司：「手の動きと結びついた触覚感認知の研究」, 2017 年度人工知能学会全国大会論文集, 2L2-OS-09a-4 (2017)
- (17) 田中由浩・佐野明人：「触覚メカニズムと指・皮膚構造」, パイオメカニズム学会誌, Vol.38, No. 1, pp.47-52 (2014)
- (18) 橋村 勝：「質感サンプルセット」, 日本バーチャルリアリティ学

会論文誌, Vol. 17, No.1, pp.48-49 (2012)

- (19) 鈴木美穂・行場次朗・川畑秀明・山口 浩・小松 紘 :「モダリティ・ディファレンシャル法による形容詞対の感覚関連性の分析」, 心理学研究, Vol. 77, No. 1, pp. 464-470 (2006)
- (20) 仲谷正史・川副智行 :「触感の感性評価ツール:ウェアラブル触動作センサ HapLog」, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.5, pp.499-501 (2012)
- (21) 永野 光・岡本正吾・山田陽滋 :「触感的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向」, 日本バーチャルリアリティー学会論文誌, Vol. 16, No.3, pp.343-353, (2011)