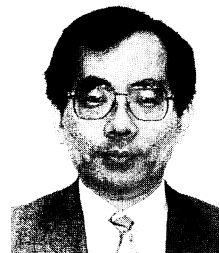


【HMD特集】

ヘッドマウントディスプレイ (HMD) における ヒューマンファクタ上の諸問題

杉原敏昭・宮里 勉

(株) ATR 知能映像通信研究所



1. 初めに

本稿は、ヘッドマウントディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) 装置が生体に与える影響について、主に問題点と考えられる点を概観するものである。最初に、本稿でのHMDの定義について簡単に述べる。HMDを字義の通りに解釈すれば、頭部に装着するディスプレイ装置であるから、一般的にHMDと言われている双眼式 (左右両眼に画像を与える) のもの (写真1) に加えて、広義には、片 (単) 眼表示のみの単眼式のものも含まれる。しかしながら、VRにおけるHMDの主な応用などを考えると、この単眼式のもの、区別して論じる必要がある。さらに、双眼式のものでも、機能的には、左右眼毎に視差画像を提示して立体視を可能とするものと、左右眼双方

に同じ画像を提示し見かけ上の大画面を与えるものがある。後者は、最近では比較的低廉な製品が発売され、所謂AV(Audio Video)機器として普及が見られるものである。ここで、HMDのVR応用での実際を考えると、VRでは現実感や臨場感を強めるために3次元画像を用いており、前者の立体視可能なものが、より主要なデバイスであると言えることができる。つまり、もっとも狭義のHMDの定義とは、双眼式で視差画像の提示による立体視機能を有するものである。さらに、HMDが与える疲労の問題では、この立体視の表示原理が大きな因子となっている。このため、本稿の議論では、この狭義の定義のHMDを主とし、単眼式及び立体視機能を有しない双眼式については、狭義のもの共通の、あるいは、広義のHMDとして



(1) 立体視機能を有するもの
(OLYMPUS Media Mask MW-601™)

(2) 家電向けAV機器のもの
(SONY Glasstron™)

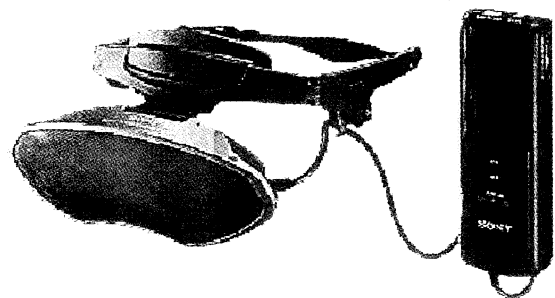


写真1 商用HMDの例

特筆すべき問題点について述べることにする。

2. インタラクシオンデバイスとしてのHMDと生体影響

現在のVR技術において、HMDは、その実装が比較的簡単なデバイス構成[1,2]で可能なことや、装着型であることの利点、例えば、没入感を与え易い点や体動に応じられること等から、実用性の高いデバイスとして用いられている。しかしながら、生体に与える影響、とりわけ悪影響については、その発生のメカニズム等で不明確な点があることも含めて、いくつかの重大な問題点がある。これまでに知られている代表的な問題点を挙げると、眼精疲労、違和感、所謂「酔い」(*1)症状、不快感、装着感の悪さ、首から肩や腕にかけての疲労及び疲労感(*2)と痛みやこり、提示画像への不自然な印象、奥行き知覚精度の低下などがある。これらは、実際にHMDを用いる利用者からの訴えとして顕著なものである。これらは、いずれも、インタラクシオンデバイスであるHMDが、生体に対して、生理的及び心理的な負荷を与え、その結果として、生体に引き起こされた症状であると考えることが出来る。ここで、議論を判りやすくするために、これらを分類して考える。分類のやり方として、HMDは人間と機械システム系を仲介するインタラクシオンデバイスであることに着目する。そこには、人間が身体の一部を用いて操作することと、人間からの指示と機械システム側からの応答が存在している。従って、身体を用いることによる生体の負荷や負担、すなわち、操作時における疲労やストレスの問題と、操作指示に関する適合性の問題とに分けることができる。また、各々には心理的な側面と生理的な側面がある。この方法で、前にも述べた問題点を含む各種の影響を分類すると、表1の様になる。

ここに示される様に、HMDの生体影響は、眼だけでは

なく広く各部位に及んでいる。これらの症状と原因との因果関係は非常に複雑であり、いくつかの原因が重なり合って、ある症状を引き起こすこともあれば、いくつかの症状自体が重なり合って不定愁訴の様な複雑な症状に至ることもある。例えば、眼精疲労の問題は、所謂VDT(Visual Display Terminal)症候群[3]の様な視覚ディスプレイ一般にある悪影響と、後述する輻輳調節矛盾と呼ばれる立体視表示の原理に関する短所によるものが混在しているものと考えられる。また、「酔い」症状の様に発症のメカニズム自体が不明確なものもあり、これらの影響の全体像は未だに明らかになっていない。このため、本稿では、重大な影響と、これまでの諸研究例によって発症のメカニズムや因果関係が比較的明確になっている事柄に要点を絞ることとする。次に、これらの影響の度合いについて考えると、HMDにおいては、CRT(Cathod Ray Tube)等の他の一般的な視覚ディスプレイよりも深刻な症状がある。例えば、強い不快感を与える「酔い」症状や、一般的なCRT(*3)等よりも、その度合いが大きいことが知られている眼精疲労の問題などである。

以上、HMDが生体に与える影響の概要について述べた。次章からは、いくつかの主要な問題点毎に、具体的に引き起こされる症状や研究例を挙げながら、その原因と発生のメカニズム、デバイスとして克服しなければならない点などについて述べる。

3. 疲労とストレス

疲労やストレスとは、生体にとって過剰な負荷となる外界からの刺激によって、生体に生理的および心理的な負担が生ずることで現れるものである。また、負荷となる刺激は、デバイスの物理的な特性などの因子によって、その過多の程度が異なってくる。HMDは、視覚ディスプレ

表1：HMDが生体に与える各種の影響

	生理的影響	心理的影響
疲労・ストレス	眼精疲労、疲労（首、肩、腕） 痛みやこり症状（眼、首、肩） 眼の不調（かすみ、かわき等） 頭の重さ 酔い症状、全身疲労・倦怠 装着感（装着部位の当たりや熱） 精神的なストレス（短～長期）	違和感、不快感 疲労感（眼、首、肩、腕） 装着感 （良し悪しの印象、感触、締め付け感）
操作適合性	情報の読みやすさ（にくさ） （表示面の物理特性に左右されるもの） 限られた視野 像の細かさ（表示の解像度）	提示画像の不自然さ、違和感 現実とは異なる空間知覚 奥行き精度の低下 作業効率/成績の低下

イの一種であるので、眼自体での負担があり、また、眼には瞳孔や調節といった自律神経に支配される器官、機能を有するために、自律神経系の負担も生じる。さらに、インタラクティブデバイスとして、作業時の姿勢や動作に関する部位での負担が生じる。その負担による具体的な症状であるが、HMDも含む視覚ディスプレイ一般では、利用者の長時間の使用に伴い、表1にも示す様な、眼のかすみや疲れ、首、肩、腕、手などの部位での疲労の亢進、さらには全身疲労や倦怠などの症状や中長期的な精神的ストレスの出現までに至ることが知られている。これまでの研究において、一般の視覚ディスプレイが生体に与える疲労やストレスの問題は、その代表的なものとして、所謂OA作業時におけるVDT症候群(*4)の評価例が数多くあり、その成果より、評価手法、眼精疲労や頸肩腕症候群の発症のメカニズムについて一定の知見類が得られている[3,4,5]。HMDでの評価においても、この知見類を活用したいが、HMDには他の視覚ディスプレイ装置とは顕著に異なる点があるため、これらを単純に適用することは適切ではないと考える。この特異な点であるが、第一に、HMDは装着型のデバイスであり、動的な作業姿勢での利用形態が主となる点である。第二に、前述の様にHMDを立体視ディスプレイとして考えると、その表示原理に関連した負担がある点である。HMDにおける負担の問題は、これらの点に因るものと、一般の視覚ディスプレイとも共通するものが混在していると考えことができ、これが、問題の解明を複雑にしている。さて、議論が前後するが、VDT症候群評価での知見を援用すれば、視覚ディスプレイ一般における負担の主要因は、(1)作業空間内の機材レイアウトとそれに対応する姿勢、(2)デバイスの操作に関する身体部位への負担、(3)表示情報の読み取りに関する視覚的負担、があるとされている[3]。この3つの内で、(1)および(2)については、頭部に装着して日常動作に近い動的な作業姿勢を取り得るHMDは、他の視覚ディスプレイとは、負担を与える因子が大きく異なるものと考えることができる。また、(3)の読み取りに関する因子は一般のCRT等と共通するものと考えることができる。これに加えて考慮すべき点は、表示内容や提示手段に関する要因の取扱いである。例えば、記憶に新しいものとしては、テレビのアニメーション番組でフラッシュを過度に用いた表現手法(*5)によって、光過敏反応によるものと推定されるめまいなどの症状が集団的に引き起こされた例がある。また、嫌悪を催す様な内容が心理的に大きな負担となることは言うまでもない。この様な問題は、画像を生成あるいは制御する側が主たる要因であって、表示デバイスレベルのみの問題と

して議論することは適当ではない。しかしながら、既存の評価研究例では、これを混同している例も見受けられる。以上の点に留意すると、疲労とストレスに関しては以下を要点として挙げる可以考虑。

- (1)一般のディスプレイとも共通する視覚性の負荷
- (2)輻輳調節矛盾が与える過重な視覚性疲労
- (3)装具としての負荷と負担
- (4)HMD酔い症状

ここで、(1)は、一般的な視覚ディスプレイと共通した負荷の問題であり、定義付けで述べた広義のHMD全てに共通する点である。(2)は、両眼視差提示方式の立体視ディスプレイに固有の問題点であり、過重な疲労の原因として知られているものである。(3)は、動的な作業姿勢と動作に関する因子である。HMDは日常的ではない装具として負担を与えているものと考えることができる。これも、広義のHMD共通の点である。(4)は、発症のメカニズムなどで不明確な点が多いが、HMD利用における深刻な問題点と考えられているものである。これら各々について、以下に検討を行う。

- (1)一般のディスプレイとも共通する視覚性の負荷

これは、情報を視覚的に表示するディスプレイとしての特性に関する負荷要因である。HMDは視覚ディスプレイであり、利用者は、そこに表示される情報を読み取ることで、何らかの判断や行動を行う。従って、ここでは、利用者の読み取りの過程における生理的及び心理的な負荷の問題があり、以下に示す様な要因が、その負担を左右している。第一には、情報の読み取りのしやすさ(しにくさ)に関する表示面上の物理的な特性である。この情報の読み取りのしやすさは負荷の過多と直接的な相関がある。この表示面上の物理的な特性については、既存の研究例によれば、表示輝度とコントラスト、色調、グレアなどが主要な因子とされている[3,6]。さらに、一般のCRT等では、これに周辺環境からの外光の影響が加わるが、これは、HMDでは単眼式のものがある。この表示面の物理的な特性については、VDT症候群評価での知見より、具体的なガイドライン等が勧告されているので[6]、HMDでも、これに準ずることが必要と考える。第二には、眼の機能への影響がある。HMDでは、利用者は眼前の発光体である表示面を注視し続けねばならない。このため、輻輳、調節、瞳孔の各機能[7,8]は、固定的な不自然な状況を強いられ、これが大きな負担を与えるものと考えることができる。また、両眼視差の提示による立体視表示の場合には、輻輳と調節の連動メカニズムにおいて不自然な

状態が生じ、詳細は次節で述べる輻輳調節矛盾と呼ばれる現象が生じる。また、調節と瞳孔は自律神経に支配された機能であるので、自律神経系への負荷が増し、これが、眼に限らない悪影響を出現させているものと考えられている。第三に、これは後述の適合性の問題でもあるが、利用者は、表示されている情報を読み取る際に、それを正確に読み取ろうとする努力を要し、これが、精神的な負担感を増すものと考えられている。これらの負荷を定量的に評価する方法は、先行するVDT症候群の評価例で数多くの提案がなされている。例えば、石川らの報告[4]、栗本らの報告[5]などである。これらの提案手法を用いることで、客観的かつ多角的に、与えられている負荷を評価することが可能である。ただし、これらの視覚性の負荷自体が与える負担は、疲労やストレス要因の一部分でしかないと考える。HMDにおける疲労やストレスは、上に述べた視覚性負荷に加えて、後述する各種の負荷の要因が組み合わさった複合的なメカニズムで出現しているものと考えられる。

(2) 輻輳調節矛盾が与える過重な視覚性疲労

次に、立体視ディスプレイ[9]としての表示原理に関する負荷と負担について述べる。現在もっとも普及しているHMDを含む両眼視差（提示）方式の立体視ディスプレイには、利用者に大きな疲労を与える問題があることが知られている(*6)。例えば、畑田[10]によれば、最悪の場合には2次元表示のディスプレイに比べて2倍程度の疲労を与えることが示唆されている。この疲労の原因として、輻輳調節矛盾と呼ばれる現象がある。両眼視差方式の立体視ディスプレイは、奥行きの手掛かり要因[7]の中で、両眼視差のみを再現するデバイスであるが、長田の報告[11]

に見られる様に、比較的近い視距離においては、両眼視差は最大の手掛かり要因であるので、実用上は妥協可能な程度の立体感を人間に与えることができる。しかしながら、この方式においては、図1に見られる様に、視差画像を提示する距離が固定されているために、輻輳によって知覚される輻輳距離 D_v と調節によって知覚される調節距離 D_a が一致していない状態が出現する。これが輻輳調節矛盾現象である。この矛盾（不一致）は、輻輳と調節の間にある自然な連動のメカニズム[12]を阻害し、大きな生理的負担を出現させているものと考えられる。輻輳調節矛盾による疲労評価については、前述の畑田の他、奥山の報告[13]、井上の報告[14]、そして、筆者らの報告[15,16]などがある。畑田や奥山の報告は、レンチキュラー板と通常のCRTといった実装手法の異なるデバイス間での評価報告であり、比較するデバイス間で前述の表示面の物理的特性等が異なるために、厳密な評価とは言い難い。一方、井上の報告では、輻輳角が可変にできる実験的なHMDを用い、また、我々の場合は、視差画像の提示距離が制御可能で輻輳調節矛盾を無くすることも可能なHMDシステム3DDAC[17]を用いることで、表示デバイスが等しく輻輳調節矛盾の度合いのみが異なる刺激提示環境を実現して、より精緻な結果を得ている。この井上および我々の評価によれば、輻輳調節矛盾による疲労は、最低10分程度で出現しており、これは、他の一般的な視覚ディスプレイに比べて極めて短い時間である。このことから、輻輳調節矛盾が与える疲労の度合いが大きいことが判る。また、我々の評価では、輻輳と調節とで知覚する距離が異なることに因るものと考えられる奥行き知覚精度の低下も観察されている。上記で述べた3DDACシステムは、輻輳調節矛盾を解消する一つの試みである[18,19]。

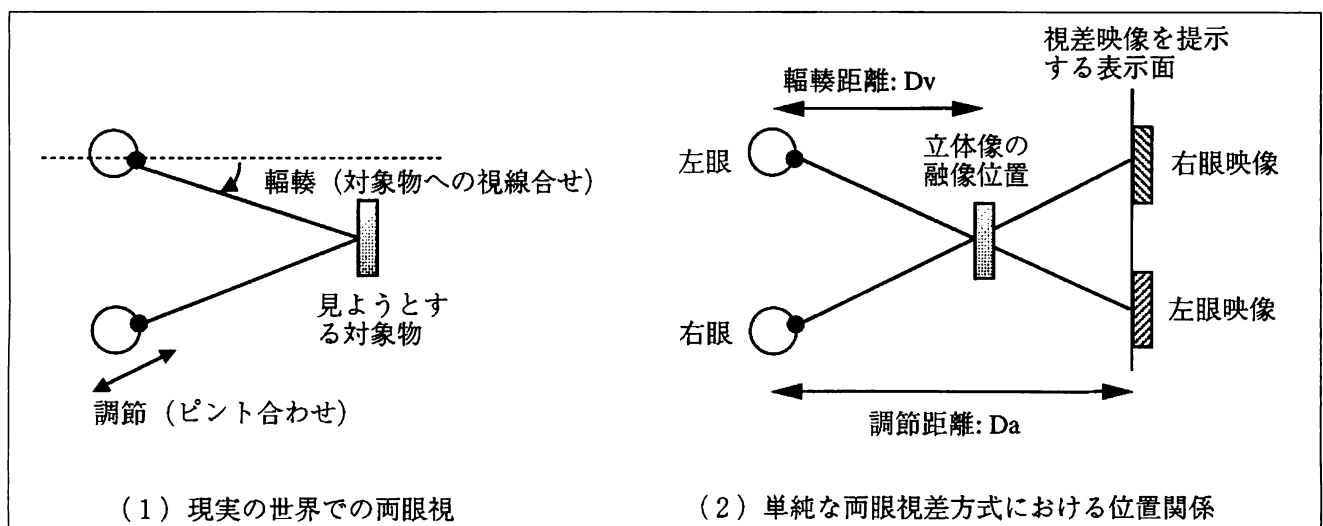


図1 両眼視差方式における輻輳調節矛盾現象

(3) 装具としての負荷と負担

既存の研究例では着目されていないが、HMDは頭部に装着する装置であり、軽くはない重量と前後左右の重量配分の点から、装具として非日常的な負荷を与えているものと考えられ、この負荷に起因する疲労の問題がある。この問題について、我々は、実験的手法による簡単な評価を行った[19,20]。これは、HMDの総重量と重量配分を模したダミーの帽体を用い、その総重量と重量配分を刺激条件として、首、肩、腕での筋負担を評価したものである。この結果より、HMDの総重量が増し、荷重分布に不均一が生ずる程、頸部の筋負担が増大する傾向が確認できた。この不均一は、左右の配分の場合、200g程度の違いでも顕著に疲労が増すことが確認されている。また、1時間程度の長時間装着を行うと、負荷が痛みや不快感を引き起こすことも確認できた。従って、HMDの総重量及び荷重分布も、生体影響上は重要な因子であると言える。また、この因子は、首、肩、背の筋に負荷を与えており、その負荷は、疲労のみならず痛みや不快感を引き起こすものである。ここでは、疲労自体による肉体的な作業効率の低下に加え、痛みや不快感等の感情的な悪影響は、作業の所謂質的な面への影響が大きいものと考えられることができる。また、装具としての観点からは、利用者からの装着部位での違和感や不快感、例えば、締めつけ感、装着部位への当たりの感触と熱のこもりなどの訴えに注目すれば、官能検査などの手法によって、適切な締め具の形状などを検討する必要がある。

(4) HMD酔い症状

所謂「酔い」として知られている症状は、HMDの装着時における大きな問題点であり、利用者に強い不快感を与えるものである。この「酔い」については、発症の原因やメカニズムが未だに明確に解明されていない。また、頭部の動きに対する表示画像の追従遅れも、「酔い」の一因であると考えられている様に、画像を生成、制御する側の因子も大であると考えられることができる。この「酔い」症状については、中川が網羅的に報告しているので[21]、これを参照されたい。

4. インタラクティブデバイスとしての適合性の問題

ここで言う適合性とは、人間と機械システム系とのインタラクションにおける、両者間の親密さや馴染みの良さ悪しなどの関係性を総称的に呼ぶものである。適合性の問題は、主に心理的な負担と密接に関連するものと考え

られている。既に表1でも示す様に、利用者は、HMDによって提示される情報空間に対して、違和感や不自然さなど、親和性の点で良好でない印象を持っている。また、その提示される情報空間内での作業の効率や成績について考えると、現実の空間に比べて劣っている問題点がある。これらの問題点は、提示される空間内での知覚特性[22,23]が現実の空間と異なっている、すなわち、提示される空間内での現実性の再現度が低いことを示している。ただし、これらの問題点は、提示される画像の質、内容に因る点が大であり、前にも述べた様に、画像を生成、制御する側の要因、責任であると考えることが望ましい。デバイス単体でのHMDが与えるものは、前章までに述べた各種の負担によって知覚精度に悪影響を及ぼすもの、例えば、前章の(2)に述べた輻輳調節矛盾による奥行き知覚精度の低下と、負担による疲労が亢進することで認知判断プロセスに悪影響を与えることが考えられる。

5. まとめ

以上、簡単ではあるが、HMDが生体に与える影響について、問題点を主として述べた。本稿で述べている様に、その生体影響には深刻なものも多く、HMDは他の一般的な視覚ディスプレイよりも過大な負荷を生体に与えるデバイスと言うことができる。これは、今後、VRの応用が普及し、HMDのユーザ層が学術や産業分野等の限られた層から、より幅広い一般的な層に普及した場合に、大きな問題として表面化するおそれがある。この問題は、VR技術が未だに発展途上にあり、研究開発の主眼がデバイス自体の実現や進化に置かれ、その実現化された技術が与える影響の評価検証が後追いになりがちなことにも起因するものと考えられるが、今後のユーザ層の広がりを考慮すれば、ユーザの安全性や快適性への配慮の点から、影響の評価検証をより重要視する必要がある。また、評価技法を確立することで、評価結果を解析、蓄積し、安全で使いやすい人に優しいデバイスを実現するための設計指針を導出する必要があるものと考えている。本稿が、こういった次の研究課題への一助となれば幸いである。

参考文献

- [1] Fisher, S.S., et al., : "Virtual Environment Display Systems", ACM Proc. of Workshop on Interactive 3D Graphics, 1990
- [2] Fischer, R., E., : "Optics for Head-Mounted Displays", Information Display 7 & 8/94, pp. 12 - 16, 1994
- [3] 小木：「VDT作業の問題点とチェックポイント」、労働の科学、Vol.37、No.12、pp. 4 - 13、1982
- [4] 石川：「瞳孔・調節—とくにVDT作業と眼疲労の他

- 覚的証明法について」、第40回日本自律神経学会総会、1988
- [5] 栗本他：「VDT作業とpaper作業における眼精疲労の比較検討」、臨眼、Vol.37、No.8、pp.1099-1104、1983
- [6] 労働省労働基準局：「VDT作業のための労働衛生上の指針」、基準局発令第705号、1985
- [7] 松田著：「視知覚」、培風館、1995
- [8] 三島他編：「眼科MOOK眼科一般検査法」、金原出版、1978
- [9] 例えば、増田著：「3次元ディスプレイ」、産業図書、1990
- [10] 畑田：「疲れない立体ディスプレイを探る」、日経エレクトロニクス、No.444、pp.205-223、1988
- [11] 長田：「視覚の奥行距離情報とその奥行感度」、テレビジョン学会誌、Vol.31、No.8、1977
- [12] Semmlow, J., Heerema, D., : "The synkinetic interaction of convergence accommodation and accommodative convergence", Vision Research, Vol.16, pp.1237-1242, 1979
- [13] Okuyama, F., : "3D Images and Visual Fatigue", Proc. of IDW'97, pp. 839-842, 1997
- [14] 井上他：「HMDの輻輳角が視機能に与える影響」、3次元画像コンファレンス'98、pp.245-250、1998
- [15] 杉原、宮里：「輻輳調節矛盾による疲労の定量的評価」、ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 CD-ROM 予稿集、1998
- [16] Sugihara, T., Miyasato, T., : "An Evaluation of Visual Fatigue in Binocular Disparity 3-D Display", Proc. of IDW98, 1998
- [17] 志和、他：「焦点調節を補償する立体表示3DDAC(3D Display with Accommodative Compensation)の提案」、テレビジョン学会誌、Vol.50、No.5、pp.570-576、1996
- [18] 山内他：「二眼式立体表示システム観察時の調節・瞳孔反応」、3D映像、Vol.7、No.1、pp.15-19、1993
- [19] 比留間他：「調節応答から見た両眼融合式立体画像の観視条件」、信学論D-II、J73-D-II、No.12、pp.2047-2054、1990
- [19] 和泉他：「HMDの重量バランスに関する評価」、機械学会大会予稿集、1998
- [20] 杉原他：「頭部装着型デバイスの装着感の評価」、第14回ヒューマンインタフェースシンポジウム、pp.715-720、1998
- [21] 中川、大須賀：「VE酔い研究および関連分野における研究の現状」、日本バーチャルリアリティ学会論文誌、Vol.3、No.2、pp.31-40、1998
- [22] 畑田：「人工現実感に要求される視空間知覚特性」、人間工学、Vol.29、No.3、pp.129-134、1993
- [23] Surdick, R.,T., et al., : The Perception Distance in Simulated Visual Displays, Presence, Vol.6 No.5, pp.513-531, 1997

注：

- *1:現状で慣用的に用いられている用語である。
- *2:本稿では、「疲労」と「疲労感」は区別して論ずる。「疲労」は生理的な負担の度合い(指標)を言うこととし、「疲労感」は主観的な印象によって表される「疲労」の指標を言うこととする。
- *3:ここでの議論は、比較対象を2-D表示のCRTとしたものである。表示画像が2-Dであるか3-Dであるかは、画像を生成、制御するホスト側及びその表示内容も含めた問題であり、表示デバイスレベルのみでの議論は正確さに欠ける。しかしながら、VRでのHMD応用は、定義付けでも述べた様に、3-D画像表示が主であるので、ここでは、表示デバイスレベルでの議論として単純化してある。
- *4:主に作業時として事務処理などの所謂OA作業を想定した用語である。また、VDT症候群とは、例に示す様な種々の症状、悪影響の総称であり、明確に規定されている疾患ではない。また、症状が複雑に組み合わせられた不定愁訴も含まれる。
- *5:正確には、この手法が原因と推測されている。
- *6:HMDに限らず、同様の表示原理のレンチキュラー板、イメージプリッタ、偏光・時分割メガネなどの3次元ディスプレイに共通する問題である。

略歴

杉原敏昭(すぎはら としあき)

(株)ATR知能映像通信研究所 第5研究室。

昭和61年、筑波大学大学院修士課程理工学研究科修了。同年、Schlumberger入社、油田検層機器および検層解析システムの開発に従事。昭和63年、リコー入社、中央研究所および情報通信研究所にてAI、HI、感覚計測等の研究に従事。平成9年よりATR出向、VR環境の研究に従事。ACM、US Planetary Society、SID、情報処理学会、電子情報通信学会、SICEヒューマンインタフェース部会、各会員。

宮里 勉(みやさと つとむ)

(株)ATR知能映像通信研究所 第五研究室、室長。

昭和51年電通大・電子卒。昭和53年東京工業大学大学院修士課程修了。同年、KDD入社。研究所を経て平成5年より、ATRに出向。工学博士(東京工業大学)。VRによるコミュニケーション環境の生成とHIが主な研究テーマ。