視方向知覚と空間感性の関係を考慮した自動車インテリア構造の検討*

武田 雄策^{*1}, 大黒谷 陽子^{*2}, 村瀬 健二^{*2}
大坪 智範^{*2}, 橋本 悟^{*2}, 伏見 亮^{*2}, 民谷 謙^{*2}Analysis of Automotive Interior Structure
Considering Relationships Human Visual Direction Perception and Visual Space *KANSEI*Yusaku TAKEDA^{*1}, Yoko DAIKOKUYA, Kenji MURASE,
Tomonori OHTSUBO, Satoru HASHIMOTO, Akira FUSHIMI and Ken TAMITANI^{*1} Mazda Motor Corporation, Technical Research Center
3-1, Shinchi, Fuchu-cho, Aki-gun, Hiroshima 730-8670, Japan

This paper discusses a design methodology of vehicle interior layouts and shape matching visual space *KANSEI* characteristics considering human visual direction perception. Relationships between perception and *KANSEI* of direction need to be quantified for the vehicle interior design based on multidisciplinary optimization among the *KANSEI* evaluation values of human visual direction and the other vehicle performances. Experiments were carried out for some interior layouts and shapes, which were displayed by immersive virtual reality system, with some subjects who develop the vehicle interior package. And, *KANSEI* evaluation values were measured by visual analog scale method for recording continuously. Experimental results demonstrate that the perception and *KANSEI* of direction have changes like sigmoid curve according to layouts and shapes. Also, *KANSEI* response surface, which was derived by using linear basis function models for expressing its characteristics, was applied to the A pillar design study.

Key Words : *KANSEI* Characteristics, Visual Direction Perception, Visual Analog Scale Method, RBF Kernel

1. はじめに

自動車の車室内開発では、広々とした空間を確保したい一方、車体の軽量化や独自デザインの実現が必要になるため、狭い空間で広く感じる設計が求められる。この実現には、距離や角度などの車室内寸法の視距離・視方向といった視空間座標の知覚と広さや目障りなどの空間の感性特性との関係を明らかにする必要がある。

これまで自動車や建築などの分野にて、人間の空間の感性特性のメカニズムを解明する研究が数多く報告されている^{(1),(2)}。松尾ら⁽¹⁾は国内外で行った自動車の車室内の主観評価に対し、記述統計的分析を行い、車室内の大きさと広さ感覚は単調に比例しないことを報告している。武井ら⁽²⁾は網膜に占める建物の大きさを物理尺度として、住宅地域全体の空間の感性特性を評価している。しかし、主観評価とこの物理尺度との関係を解析することを考えた場合、車室内のような狭い空間では、両眼視差の影響が大きくなるため、直接適用するのは難しい。

一方、視空間座標の知覚に関わる両眼視差に着目した研究が、視覚心理学や運動生理学の分野で古くから多くなされている^{(3)~(7)}。Tyler⁽³⁾は、視対象が同一の距離にある場合でも、同一の距離には感じず、錯覚が起こる範囲(心理物理的ホロプター)が存在することを発見し、Groveら⁽⁴⁾は、その錯覚が発生する境界を実験的に明らかにしている。また、Tylerは奥行き知覚は、両眼の網膜像差量と知覚量が線形に保つ範囲と、知覚できる網膜像差量の上限が存在することを定量的に示した⁽⁵⁾。さらに、山田⁽⁶⁾、田中ら⁽⁷⁾は注視点の位置や着座姿勢に依存して眼球と頭部の運動の分担比が変化することを実験的に示した。このように、距離や角度に対する空間の感性

* 原稿受付 2013 年 4 月 1 日

^{*1} 正員, マツダ(株) 技術研究所 (〒730-8670 広島県安芸郡府中町新地 3-1)^{*2} マツダ(株)

E-mail: takeda.yus@mazda.co.jp

特性や視方向・視距離といった視空間座標の知覚特性のメカニズムはそれぞれ明らかにされてきているが、視空間座標の知覚が空間の感性特性に与える影響について評価解析しようとするものではない。そのため、車室内のレイアウトや形状を机上で検討する際に、多性能との最良なバランスを考慮して定量的に設計を行うことは難しい。

そこで本研究では、車室内寸法の視空間座標の知覚－空間感性の関係を定量化し、設計へ適用することを目的とする。著者らは、これまで A ピラー形状と空間感性との関係について、実験的に評価解析し、車両設計へ適用を進めてきた^⑧。しかしながら、車室内の構造形状から知覚する自己中心的距離や方向と空間感性との関係が不明であった。

本報告では、(1) 自動車の A ピラーやフロントヘッダ、およびインストルメントパネルに想定した方向に、視標を被験者へ提示し、感覚受容器を通し角度を知覚する実験を行い、車室内寸法の視方向知覚の特徴を、物理尺度を用いて解析する、(2) 次に、運転席側の車室内を被験者へ提示して主観評価を行い、車室内寸法に応じた空間の感性特性の変化を解析する、(3) そして、(1)、(2) の結果から車室内寸法の視空間知覚の特徴に基づき空間の感性特性の変化をモデル化する手法を提案する。

2. 人間の視方向の知覚能力の解析

2・1 実験装置

図 1 に人間の視方向の知覚特性を解析するために用いた実験システムの概略を示す。本システムは、被験者の視線を計測する視線計測部と、2D 画像を提示する表示部からなる。視線計測部では、アイマークレコーダ EMR-9 (NAC Image Technology 社製、キャップ式アイカメラ、計測範囲: 水平 ± 40 deg 垂直 ± 20 deg, 眼球運動分解能: 水平 0.1 deg 垂直 0.4 deg, 瞳孔径計測分解能 0.02 mm, サンプルング: 240 Hz) を用いて被験者の注視方向を計測し、同時に被験者の発話を記録する。被験者の姿勢は、体幹と頭部を光学式モーションキャプチャカメラ (MotionAnalysis 社製、サンプルング: 60 Hz) によってトラッキングして計測する。表示部における 2D 画像提示は、図 1 に示すように、十字の視標の画像を指標の位置を変化させながらプロジェクタで表示して行う。

2・2 実験方法

実験は呈示画像に対し、知覚した視方向を、角度で口述する口頭諮問形式とした^{⑨,⑩}。被験者には、図 2 のように正面から大きさ 0.67 deg の十字視標を、水平垂直角度 (θ_a, φ_a) をランダムに変更した画像を $200 \sim 400$ 回程度呈示してもらい、被験者の角度の回答から知覚能力を解析する。なお、画像呈示前には、十字がランダムに分布した中に回答基準 θ_{mi} となる十字が表示された画像が呈示され、その基準からの角度変化を口述する。実験条件は、ドライバの視点から A ピラーやフロントヘッダ、インストルメントパネルの距離と方向を想定して、

Fig. 1 Measurement system for the angle perception ability.

Fig. 2 Experimental condition for displaying 2D target.

- 条件 I : $l_a = 0.45 \text{ m}, (\theta_a, \varphi_a) = (12 \sim 34, 0) \text{ deg}$,
 条件 II : $l_a = 0.35 \text{ m}, (\theta_a, \varphi_a) = (0, 6 \sim 30) \text{ deg}$,
 条件 III : $l_a = 0.60 \text{ m}, (\theta_a, \varphi_a) = (0, -24 \sim -10) \text{ deg}$,
 条件 VI : $l_a = 0.80 \text{ m}, (\theta_a, \varphi_a) = (12 \sim 34, 0) \text{ deg}$,

の 4 条件とした。被験者には、実験前に (θ_a, φ_a) を示しながらその感覚を覚えてもらった。その際、本実験で用いる角度の上限値と呈示の刻み 2 deg は分からないように練習させた。

2・3 視方向の知覚能力特性

被験者 3 名の水平垂直角度 (θ_a, φ_a) の知覚能力の実験結果を示す。このとき、被験者には (a) 眼球運動のみの運動, (b) 頭部・眼球の協調運動, の 2 種類の運動に拘束して視方向を角度で知覚させた。図 3 ~ 8, 10 は、それぞれ横軸は呈示した角度、縦軸は被験者が知覚した角度、図中の破線は正解を示し近づくことで正確に知覚していることを意味する。また R は、シグモイド関数 P_θ ,

$$P_\theta(x) = \frac{\exp(a_1 x - a_2)}{a_3 + a_4 \exp(-a_1 x + a_2)}, \quad (1)$$

との相関係数を示す。以下の視方向の知覚特性の解析では、 x にそれぞれ近似する水平垂直角度 θ_a, φ_a を代入して係数 a_i ($i = 1 \sim 4$) を同定したのち、相関係数を計算する。

図 3 ~ 8 は、条件 I ~ III の右上下方向における角度知覚特性を示す。図の一点鎖線と灰色陰影は、正確に知覚した角度 (近似したシグモイド関数 P_θ との交点) と呈示の刻み幅 ($\pm 2 \text{ deg}$) である。図 3 ~ 5 から、右方向の視方向知覚特性は、知覚精度が高い角度を中心に、大きい範囲は角度を絶対値で小さく知覚し、小さい範囲は角度を絶対値で大きく知覚すること、眼球と頭部運動との協調運動によって知覚精度が高い角度が眼球運動のみの知覚精度と異なること、がわかる。図 6 ~ 8 より下方向の視方向知覚特性の傾向も右方向と同様の傾向をもつが、右方向と比較して上方向の知覚能力は頭部運動の影響を受けにくい。さらに、すべての条件において、相関係数 R が高くシグモイド関数的な知覚特性を有していることがわかる。以上より、Grove ら⁽⁴⁾ が示した距離を同じに感じる心理物理的ホロプターの曲面と同様に、右上下方向の視方向の知覚特性も絶対座標系において湾曲する傾向を持つことが推測される。

図 9 は、頭部・眼球の協調運動における、視方向知覚を計測した眼球・頭部運動の時系列の一例である。図 (a), (b) は、それぞれ被験者 A の右方向 (条件 I, $(\theta_a, \varphi_a) = (30, 0) \text{ deg}$) と上方向 (条件 II, $(\theta_a, \varphi_a) = (0, 12) \text{ deg}$) の知覚しているときの 0 deg ~ 十字指標までの頭部・眼球運動 (遠心性) を示した一例である。横軸は時間、左側縦軸はそれぞれ初期姿勢からの右・下方向の頭部回転角度、右側縦軸はアイマークレコードから計測された視点位置を示す。黒線は頭部回転角度、灰線は視点位置である。なお、被験者はいずれも 2 sec 近傍で角度を回答している。図 (a) は、右方向では最初に眼球だけで視標を追跡したのちに、頭部との協調運動が発生し、眼球位置が定常状態に安定していることを示している。また、右方向の角度回答時は、眼球角度がほぼゼロであり、頭部角度のみが変位している。一方、図 (b) が示す上方向では、頭部運動が眼球より先に角度が変位している。山田⁽⁶⁾ は遠心性指標を注視させたときの頭部・眼球運動の分担比が、水平方向と上下方向で異なることを示しており、本報告の結果と傾向が一致する。また、計測した視方向知覚の正確さと頭部・眼球運動の結果から、この被験者 A は頭部と眼球の協調運動で知覚している場合でも、右方向の視方向知覚は眼球運動の情報を重視して知覚するが、上方向は頭部・眼球運動の双方の情報をを用いて知覚していることが分析できる。

図 10 は、距離や角度回答基準の違いに応じて視方向を眼球運動のみで知覚した結果を示す。図の一点鎖線と灰色陰影と斜線陰影は、各運動の拘束条件に応じて正確に知覚した角度 (近似したシグモイド関数 P_θ との交点) と呈示の刻み幅 ($\pm 2 \text{ deg}$) である。図 (a) は、条件 I, IV における距離に応じた右方向の視方向知覚の違いを示した結果である。横軸は呈示した角度、縦軸は被験者が知覚した角度で、 R はシグモイド関数との相関係数である。図から、距離が変化してもシグモイド関数の形状が大きく変化しないこと、距離によって視方向知覚が正確になる角度が変化することがわかる。図 (b) は、条件 I における 2 種類の回答基準 $\theta_{ini} = 0, 16 \text{ deg}$ による知

覚特性の差異を示している．図から，比較する基準によって，視方向知覚の正確さの傾向が変化することがわかる．

以上の結果から視方向の知覚特性は，距離，方向，回答基準，および頭部・眼球運動によって変化し，相関係数 R が高いことから，シグモイド関数的な知覚特性を持つことがわかった．

Fig. 3 Experimental results of Subject A in Condition I.

Fig. 4 Experimental results of Subject B in Condition I.

Fig. 5 Experimental results of Subject C in Condition I.

Fig. 9 Example of head motion among the experimental conditions.

Fig. 6 Experimental results of Subject A in Condition II and III.

Fig. 7 Experimental results of Subject B in Condition II and III.

Fig. 8 Experimental results of Subject C in Condition II and III.

Fig. 10 Differences of perception ability according to the distances l_a and initial angle θ_{ini} .

3. 人間の車室内空間の感性特性の解析

3・1 実験環境

図 11 に車室内の空間の感性を解析するために用いた実験システムの概略を示す。本システムは、被験者の運動を計測する動作計測部と、3D 画像を提示する表示部からなる。動作計測部において、光学式モーションキャプチャカメラ (MotionAnalysis 社製, サンプルング: 60 Hz) を用いて頭部の動きをトラッキングし、被験者の視点に応じた立体映像が歪みなくシャッター眼鏡を通して提示される。表示部における 3D 画像提示は、図 11 に示す CAVE 多面立体視表示システム (SCSK 社製, 没入型 VR, スクリーン: 2.1 m 四方 5 面) を用いる。

3・2 実験方法

実験は、3D 提示画像に対し、VAS (Visual-Analog-Scale) 法を用いて主観評価を行った。なお、空間の感性の評価項目は、事前に車両に対して評価グリッド法を用いたインタビューを行って抽出した評価語を用いた。3D 提示する車室内は、図 12(a) 示すアイポイントを基準とし、A ピラーの P-P 断面までの距離 $L_a = 0.45 \sim 0.60$ m, A ピラーの見開き角 $\Theta_a = 17 \sim 27$ deg, および A ピラーの傾斜角 Φ_a (任意の 2 種類) の範囲で変化させて設定する。実験に用いた車室内は、実験計画法に基づいて、図 12(b) に示す制御因子 (L_a : 4 水準, Θ_a : 4 水準, Φ_a : 2 水準) を配置した L16 直交表を用い、各 10 分程度の主観評価から車室空間の感性特性を計測する。

3・3 A ピラーによる車室内の感性特性

計測結果の一例として、車室内の居住性能開発を行っている被験者 1 名における車室内空間の違いによる空間の感性特性の解析を行った結果を示す。図 13, 14 は、抽出した評価語のうち「広々とした」と「見晴らしがよい」の項目で (L_a, Θ_a) = (0.45 m, 27 deg) を基準に VAS (Visual-Analog-Scale) 法を用いて主観評価した結果である。横軸はアイポイントから A ピラーの P-P 断面までの距離 L_a , A ピラーの見開き角 Θ_a , A ピラーの傾斜角 Φ_a で構成される制御因子、および交互作用項である。縦軸は各評価語の VAS の計測値である。なお、横軸の番号は、図 12(b) の L16 直交表と対応づけられる。図より、制御因子 A, B を変化させたときの主観評価は変化が大きく、「広々とした」と「見晴らしがよい」に対しては、アイポイントから A ピラーの P-P 断面までの距離 L_a , A ピラーの見開き角 Θ_a の影響が大きいことがわかる (A ピラーの傾斜角 Φ_a , 交互作用項と $P < 0.05$ で有意差あり)。また、VAS を用いて制御因子による主観評価値を計測した結果、視方向の視空間座標の知覚特性と似たシグモイド関数のような変化の形状をもつことがわかる。

以上の結果から、空間の感性特性の特徴を、車室内寸法の視方向の知覚特性の特徴を表現できるシグモイド関数で表現することを試みる。

Fig. 11 Immersive virtual reality system.

Fig. 12 Experimental condition for displaying interior 3D image.

Fig. 13 Visual analog scale “Wide.”

Fig. 14 Visual analog scale “Views of the outside looks good.”

4. 空間の感性特性の応答曲面

4・1 空間の感性特性のモデル化

空間の感性特性を、視空間知覚特性の特徴を表現できる 2 次元の RBF カーネルでモデル化することを考える。本稿では、実験で得た空間に対する感性特性の特徴を反映して応答曲面を導出するため、線形基底関数モデルを用いる。ここで空間の感性カーネル関数 $\phi(\mathbf{x})$ は、

$$\phi(\mathbf{x}) = \frac{\exp(\mathbf{x}^T \mathbf{x})}{1 + \exp(\mathbf{x}^T \mathbf{x})}, \quad (2)$$

$$\mathbf{x} = \left[\frac{L_a - L_c}{h_L}, \frac{\Theta_a - \Theta_c}{h_\Theta} \right]^T, \quad (3)$$

のシグモイド関数で表現する。ここで L_a はアイポイントから A ピラーの P-P 断面までの距離、 Θ_a は A ピラーの見開き角の変数である。また、 L_c, Θ_c は各主観評価の車室内寸法、 h_L, h_Θ は感性カーネル関数 $\phi(\mathbf{x})$ のバンド幅の定数で、 $(h_L, h_\Theta) = (0.15 \text{ m}, 15 \text{ deg})$ と設定した。ここで、主観評価値 y は、

$$y(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \mathbf{w}^T \phi(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n w_j \phi_j(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n w_j \phi_j \left(\left[\frac{L_a - L_{c_j}}{h_L}, \frac{\Theta_a - \Theta_{c_j}}{h_\Theta} \right]^T \right), \quad (4)$$

と表す。 $\mathbf{w}$ は車室内寸法 j の重み w_j ($j = 1, \dots, n$) で構成する重みベクトル、 L_{c_j}, Θ_{c_j} は実験条件 j の車室内寸法である。式 (4) を変形して重みベクトル $\mathbf{w}$ は、

$$\mathbf{w} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \cdot \mathbf{y}, \quad (5)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \cdots & \phi_{nn} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

と表される． Φ は感性カーネル行列， $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ ， $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ は， n 個の実験条件の車室内寸法に対応する重みベクトル，主観評価値ベクトルである．以上の式を用い，感性評価値の応答曲面を導出する．

4・2 空間の感性特性を用いた車室内構造の検討

図 15 は，式 (5) を用いて「広々とした」と「見晴らしがよい」に対して，導出した応答曲面結果である． R は，別に計測した主観評価値と応答曲面との相関係数である．図の白丸数字は評価基準の車室内寸法（ L_a ， Θ_a ）=（0.45 m，27 deg）におけるそれぞれの VAS 評価値，破線は応答曲面の等高線を意味する．なお，図 (a) の白丸数字を起点とする灰破線矢印は「広々とした」の VAS 評価値が同じ数値の等高線である．また，図 (b) の白丸数字を起点とする灰実線矢印は，図 (a) の灰破線矢印に対応する車室内寸法における「見晴らしがよい」の VAS 評価値である．

図から別に計測した主観評価との相関係数はある程度高く，シグモイド関数で表現できていることがわかる．また，図の (a)，(b) を組み合わせることによって，設計した値が感性にもたらす影響を調べることが可能となる．たとえば，「広々とした」の評価を固定して A ピラーの設計をする際，アイポイントから A ピラーの P-P 断面までの距離 L_a ，A ピラーの見開き角 Θ_a を灰線に沿って変更してやれば良い．このときの「見晴らしがよい」の評価に対して与える影響を確認すると，評価基準と同等の数値を満たす車室内寸法の組み合わせに範囲があることがわかる．

このように，今回提案した手法を用いて，車室内のレイアウトや形状を机上で検討する際に，多性能の最適なバランスを考慮した設計を行うことが可能となる．

5. まとめ

本報告では視空間座標の知覚に関する感性特性にマッチングさせる車室内構造の設計手法を構築するため，人間の視方向の知覚特性や車室内空間の感性特性を実験的に解析し，

- (1) 視方向の知覚特性は，距離，方向，回答基準，および頭部・眼球運動によって変化し，シグモイド関数的な知覚特性をもつこと，
- (2) VAS 法を用いて空間の感性特性を連続量として計測した結果，角度による視方向の知覚特性と似たシグモイド関数のような変化の形状をもつこと，
- (3) RBF カーネルを用いて，角度による視方向の知覚特性を表した 2 次元のシグモイド関数で応答曲面を導出できること，

Fig. 15 Examples of KANSEI response surfaces.

がわかった。今後は、被験者数や実験条件の増加による空間感性の応答曲面の精度向上を進め、空間の感性と視空間座標の知覚特性の関係のメカニズム解明を進める予定である。

文 献

- (1) 松尾 典義, 藤本 清, 長谷川 勝紀, “車室内広さ感の定量評価手法の開発”, スバル技報, Vol.37 (2010), pp. 87-91.
- (2) 武井 正昭, 大原 昌樹, “圧迫感の計測に関する研究・2 (物理尺度との対応について)”, 日本建築学会論文報告集, No. 262 (1977), pp.103-113.
- (3) Tyler, C.W., “The Horopter and Binocular Fusion”, Binocular Vision (Ed.) Regan D, CRC Press, Boca Raton (1991), pp.19-37.
- (4) Grove, P.M., Kaneko, H., and Ono, H., “The backwards inclination of a surface defined by empirical corresponding points”, Perception, Vol.30, No.4 (2001), pp.411-429.
- (5) Tyler, C.W., “Cyclopean Vision”, Binocular Vision (Ed.) Regan D, CRC Press, Boca Raton (1991), pp.38-74.
- (6) 山田 光穂, “2 次元平面状の指標を注視させたときの頭部運動と眼球運動の協調関係の分析”, 電子情報通信学会論文誌 D-II , J75-D-II-5 (1992), pp.971-981.
- (7) 田中 良幸, 楽松 武, 堀上 正義, 宮崎 透, 西川 一男, 農沢 隆秀, 辻 敏夫, “人間の眼球 関節運動特性に基づく自動車インテリア・パッケージの解析評価”, 計測自動制御学会論文集, Vol.46, No.2 (2010), pp.123-129.
- (8) 大坪智範, 武田 雄策, 岸 篤秀, 沖山 浩, “自動車車室内空間における広々感の評価手法”, 第 44 回日本人間工学会中国・四国支部 第 32 回九州支部合同開催支部大会講演論文集 (2011), pp.76-77.
- (9) 山田 光穂, 福田 忠彦, “大画面ディスプレイから受ける心理効果の客観的評価に関する基礎的検討 - 頭と目の動きの相互関係について -”, テレビジョン学会誌, Vol.43, No.7 (1989), pp.714-722.
- (10) 辻 敏夫, 島崎 知之, 金子 真, “ロボットインピーダンスに対する人間の知覚能力の解析”, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.2 (2002), pp.180-186.