バーチャルリアリティによる自動車室内の設計変更が
視覚的な広さ感に与える影響茅原 崇徳^{*1}, 坂本 二郎^{*2}

Effect of design changes of automobile cabin in the virtual reality space on visual spaciousness

Takanori CHIHARA^{*1} and Jiro SAKAMOTO^{*2}^{*1} Institute for Frontier Science and Initiative, Kanazawa University
Kakuma-mach, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan^{*2} Advanced Manufacturing Technology Institute, Kanazawa University
Kakuma-mach, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan

Received: 7 June 2019; Revised: 24 September 2019; Accepted: 1 November 2019

Abstract

Improving space sufficiency of cabin is one of significant factor in enhancing the value of automobiles. However, experiment with actual automobile mock-up requires excessive time and cost. Our aim of this study was to investigate the feasibility of spaciousness evaluation of automobile cabin by using virtual reality (VR). Twelve students (6 males and 6 females) participated in this study. The participants evaluated the visual spaciousness of automobile CG models with different roof heights R (0, +50, and +100 mm) and windshield depth W (0, +100, and +200 mm). The views from driver seat in the VR space were provided, and the subjective space sufficiency was measured in a 7-point Likert scale. The result showed that the average space sufficiency increased with the increase of the roof height and windshield depth, whereas it was almost constant irrespective of the windshield depth when $R = +100$ mm. The effect of roof height was statistically significant, whereas that of windshield was not significant. The relationship between the probability of the subjective score and the two factors (i.e., roof height and windshield depth) was formulated by applying the ordered logistic regression to the measured data. In addition, the results of ordered logistic regression were compared with a previous study in which the space sufficiency was measured in real space using an actual automobile mock-up. The results of the ordered logistic regression of this study roughly agreed with the previous study.

Keywords : Human factors, Virtual reality, Head mounted display, Cognitive psychology, Design engineering

1. 緒 言

十分な広さの車室空間を確保することは、乗員の居住性（車室空間の居心地）を高める上で考慮すべき要因の一つである（自動車技術会, 2016a, 2016b）. SAE J1100 や JIS D0301 によりヘッドルームやレッグルームのクリアランスに関する寸法が定められており（Society of Automotive Engineers International, 2009; 日本工業標準調査会, 1982）. これらの寸法は、ユーザー層（国籍や性別など）の人体寸法を想定した上で居住性を考慮して設計される（Parkinson and Reed, 2006 ; Ozsoy et al., 2015 ; 自動車技術会, 2016a）. 一方、車室空間の設計は居住性だけではなく、車体設計において考慮すべき燃費性能や衝突性能などの他の要因にも影響を与える. 例えば、車高を増加させて車室空間を拡大すると、車両前面の投影面積が増加して空気抵抗が増加し、燃費の悪化につながる（前田, 2011）. また、車室空間を広げるためにボデー骨格の板厚や断面積を減少させると剛性が低下し、衝突性能の低下につながる（Gui et al., 2018）. したがって、車室空間の広さを燃費性能や衝突性能と両立させるためには、車室空間の寸法が乗員の感覚に与える影響の定量的な評価が必要になる.

車室空間が主観的な広さ（以下、広さ感）に与える影響について、実車やモックアップを用いて検討を行った

No.19-00241 [DOI:10.1299/transjsme.19-00241], J-STAGE Advance Publication date : 13 November, 2019

^{*1} 正員, 金沢大学 新学術創成研究機構 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

^{*2} 正員, フェロー, 金沢大学 設計製造技術研究所

E-mail of corresponding author: chihara@staff.kanazawa-u.ac.jp

研究が報告されている (Reed and Schneider, 1999 ; 松尾他, 2010 ; Hiamtoe et al., 2012). Reed and Schneider (1999) は運転席のルーフが上下・前後・左右方向に可動するモックアップを作成し, ルーフの移動量を変化させて実験参加者が感じる広さ感を計測し, 計測結果に対して順序ロジスティック回帰を適用して分析を行った. その結果, ルーフの位置を頭部から離すことで広いと感じる割合が増加し, 特に上下方向に移動させた際に広いと感じる割合が顕著に増加することを確認している. 松尾ら (2010) は, 車室内の部位の寸法や角度が異なる実車を用いて広さ感を計測し, 重回帰分析を行い広さ感と車室内の各部の寸法や角度との関係を定量化した. これらの研究のように, 実車やモックアップを用いることができれば, 車室空間の広さ感を計測・評価することが可能である. しかし, 車室空間の設計因子が広さ感に与える影響を定量化するためには, 複数の実車やモックアップを用意する必要があるため, 実験の実施にコストや時間がかかるという問題がある.

実車やモックアップを使用した広さ感の評価の代替案として, バーチャルリアリティ (Virtual Reality; VR) の利用が考えられる. 近年, VR の提示装置であるヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display; HMD) が低価格化し, HTC Vive や Oculus Rift に代表される一般消費者向けの HMD が販売され, 産業現場での応用が進められている (Lawson et al., 2016; Borrego et al., 2018; Li et al., 2018). VR を応用することで実車やモックアップが不要になるため, コストをかけず, かつ迅速に車室空間の広さ感の評価が可能になることが期待される. 自動車の設計における VR の応用例として, 例えば複数の設計担当者の相互理解を目的としたデザインレビューや (Bordegoni and Caruso, 2012), 製造現場での作業のしやすさの評価や作業への教育 (Borsci et al., 2015), 運転のしやすさを評価するためのドライビングシミュレータ作成 (Sportillo et al., 2018) への応用が挙げられる. しかし, 車室空間の広さ感の評価への VR の応用については十分に検討されていない.

そこで本論文では, VR を用いた車室空間の広さ感の評価の実現可能性について検討することを目的とする. 先行研究 (Reed and Schneider, 1999) において, ルーフの上下位置の変更が広さ感に比較的強い影響を与えたことを参考に, ルーフ高さを制御因子とした. また, 広さ感が乗員のアイポイントに近い窓の大きさに影響を受けるという報告 (美記, 2013) を参考に, フロントガラスの前後方向の奥行きを制御因子とした. この二つの制御因子を変化させた CG モデルの運転席からの視点を HMD で実験参加者に提示し, 広さ感を評価させた. 広さ感の計測結果を先行研究と比較して VR による主観評価の妥当性について検討するとともに, ルーフ高さやフロントガラス奥行きが広さ感に与える影響を評価した.

2. 研究方法

2・1 実験参加者

実験参加者は 19 歳から 24 歳までの健常な学生 12 名 (男性 6 名, 女性 6 名) である. 実験参加者の身長と体重の平均±標準偏差はそれぞれ 1678 ± 93 mm と 60.7 ± 7.6 kg であった. なお, 12 名中 11 名の実験参加者が普通自動車免許を有していた. すべての実験参加者の両眼の視力 (矯正を含む) は 0.7 以上であり, HMD に表示される映像を認識するために十分な視力を有していると判断した. また, 本実験は金沢大学理工研究域「人を対象とする研究」に関する倫理委員会の承認 (承認番号: 2018-1) を得て実施した. 実験参加者には事前に実験に関する説明を行い, 書面により実験参加に対する同意を得たのちに実験を行った.

2・2 実験条件

実験で使用した CG モデルのベースとなるモデルはトヨタ社のプリウス (フューチャースイッチ社, プリウス'15) である. ベースモデルのルーフとフロントガラスに関する寸法を図 1 に示す. ベースモデルを基準とし, 図 2 に示すルーフ高さ R とフロントガラス奥行き W を変更した CG モデルを作成した. ルーフ高さの変更では, ルーフ全体を上方 (Z 軸の正方向) に移動してルーフの高さを増加させた. フロントガラス奥行きの変更では, フロントガラス上縁をルーフの曲面に沿って後方 (Y 軸の正方向) に移動してフロントガラスの領域を拡大した. ルーフ高さは 0, +50, +100 mm, フロントガラス奥行きは 0, +100, +200 mm であり, 実験条件数は 9 条件である. 9 つのモデルの側面図と上面図を図 3 に示す. VR 環境の構築には Unity5.6.0f3 (Unity technology 社) を使用した. CG モデル周囲の背景には, 金沢大学 角間キャンパス内の道路で撮影した 360 度画像を使用した.

Fig. 1 Dimensions of underlying CG model related to the roof height and windshield.

Fig. 2 Roof height and windshield depth.

Fig. 3 CG models used in the experiment.

2・3 実験手順

実験の様子と HMD に投影される映像の一例を図 4 に示す。はじめに、運転席を想定した座席に実験参加者を着座させ、HMD (HTC 社, Vive) を装着させた。次に、実験参加者ごとに VR 空間内での HMD の初期視点位置を調整した。具体的には、図 4 に示すようにステアリングホイールを把持したドライビング姿勢をとらせて体を動かさないように指示し、 $(R, W) = (0, 0)$ であるベースモデルを用いて、運転席からの視界として自然な視点位置になるように実験参加者の申告に基づいて VR 空間内での初期視点位置を移動させ、初期視点位置を記録した。その後、9 つの CG モデルをランダムな順序で提示して車室空間の広さ感に関する主観評価を計測した。主観評価の際は、ステアリングホイールを把持していれば眼球と頭部を自由に動かして VR 空間内の車室空間を確認してよいことを伝えており、体の動きに制限を設けなかった。なお、体を動かすことによる HMD の位置と姿勢の変化に伴い、HMD に投影される映像が変化する。また、CG モデルの切り替えは主観評価の実施後に実験参加者に申告にもとづいたタイミングで実施した。CG モデルの切り替えの際は、閉眼状態で待機するように指示し、CG モデルの切り替えが完了したのちに開眼させた。

Fig. 4 An example image projected onto HMD.

2・4 計測項目

計測項目は VR 空間内での HMD の初期視点位置と主観評価である。主観評価は「車室空間の広さ」を「1: 狭い」から「7: 広い」まで 7 段階で評価させた。なお、4 は「どちらでもない」を表す。

2・5 解析方法

主観評価の計測値に対し、ルーフ高さとフロントガラス奥行きを 2 つを制御因子とし、実験参加者をブロック因子とする多元配置分散分析により主効果の有無を確認し、さらに Tukey 法による多重比較を実施した。なお、有意水準は 5% とした。

また、主観評価の計測値を用いて順序ロジスティック回帰を行った。主観評価値 S が i ($i = 2, \dots, 7$) 以上になる確率を $P(S \geq i)$ とすると、順序ロジスティック回帰モデルは次式で表される。

$$\ln \left(\frac{P(S \geq i)}{1 - P(S \geq i)} \right) = a_1 R + a_2 W + b_i \quad (1)$$

ここで、 a_1 と a_2 はそれぞれルーフ高さとフロントガラス奥行きの回帰係数であり、 b_i は主観評価値 i を閾値として分割する回帰式の定数項である。統計解析にはエクセル統計 (社会情報サービス社) を使用した。

3. 結 果

図 1 の点 A (フロントガラス下縁の中心) を原点とした際の実験参加者の身長と初期視点位置の前後位置および垂直位置との関係を図 5 に示す。身長と前後位置および垂直位置との相関係数はそれぞれ 0.843 と 0.845 (ともに有意水準 1% で有意) であり、身長の増加に伴い初期視点位置の水平位置は後方へ、垂直位置は上方へ移動する傾向がみられた。

「車室空間の広さ」の主観評価の実験参加者間の平均値を図 6 に示す。なお、図中の誤差線は標準偏差を表す。主観評価を分散分析した結果、ルーフ高さの主効果は有意であり ($F(2, 88) = 33.9, p < 0.001$)、フロントガラス奥

行きの主効果 ($F(2, 88) = 1.49, p = 0.232$) とルーフ高さとフロントガラス奥行きの交互作用 ($F(4, 88) = 0.525, p = 0.718$) は有意ではなかった。また、ルーフ高さに対する多重比較の結果、すべての水準間の組み合わせにおいて有意水準 1% で有意差が存在し、ルーフ高さの増加に伴い主観評価の平均値が増加した。フロントガラス奥行きについては水準間で有意差はみられなかったが、ルーフ高さが 0 mm と 50 mm のときはフロントガラス奥行きの増加に伴い主観評価の平均値が高くなる傾向がみられた。しかし、ルーフ高さが 100 mm のときはフロントガラス奥行きの水準によらず主観評価の平均値はほぼ一定であった。図 7 に実験参加者の身長と主観評価値との関係を示す。相関係数は 0.105 であり、両者の間に有意な相関関係は認められなかった。

表 1 に順序ロジスティック回帰の結果を示す。尤度比検定の χ^2 は 56.0 であり、回帰式は有意水準 1% で有意であった。Nagelkerke の疑似決定係数は 0.420 であった。ルーフ高さとフロントガラス奥行きの偏回帰係数はともに正の値を示した。また、ルーフ高さの偏回帰係数が有意水準 1% で有意であった。なお、主観評価で 1 を付けた実験参加者がいなかったため、 $S \geq 2$ の定数項を求めることができなかった。

Fig. 5 Relationship between the height of participants and location of initial view point of HMD. The point A in Fig. 1 is the origin. The initial view point moved backward and upward with increase of the participants' height.

Fig. 6 Average subjective score of space sufficiency. The error bars represent the standard deviations. The subjective score increased with increase of the roof height. The score also increased with increase of the windshield depth when $R = 0$ and 50 mm, whereas it was almost constant when $R = 100$ mm irrespective of the windshield depth.

Fig. 7 Relationship between participants' height and subjective space sufficiency. There was no significant correlation between the height and subjective space sufficiency.

Table 1 Results of ordered logistic regression.

Variable	Coefficient	Standard error	<i>p</i> -value
Roof height <i>R</i>	3.72×10^{-2}	5.22×10^{-3}	$p < 0.001^{**}$
Windshield depth <i>W</i>	3.98×10^{-3}	2.19×10^{-3}	0.068
Constant ($S \geq 3$)	1.48	5.01×10^{-1}	0.003**
Constant ($S \geq 4$)	1.17×10^{-1}	4.03×10^{-1}	0.772
Constant ($S \geq 5$)	-7.16×10^{-1}	3.79×10^{-1}	0.059
Constant ($S \geq 6$)	-2.28	3.66×10^{-1}	$p < 0.001^{**}$
Constant ($S \geq 7$)	-4.46	5.28×10^{-1}	$p < 0.001^{**}$
<i>N</i>	108		
Nagelkerke R^2	0.420		
χ^2	56.0**		

** $p < 0.01$

Fig. 8 Subjective probability of space sufficiency with respect to roof height ($W = 0$ mm). Each line in the plots shows the probability of response less than criterion levels 3 through 7. The probability of 'sufficient' (≥ 5) increased with increase of the roof height.

Fig. 9 Subjective probability of space sufficiency with respect to windshield depth ($R = 0$ mm). Each line in the plots shows the probability of response less than criterion levels 3 through 7. The probability of 'sufficient' (≥ 5) increased with increase of the wind shield depth.

図8と図9に、表1の回帰係数を用いて求めたルーフ高さとフロントガラス奥行きの変化に対する主観評価の値の確率の変化を示す。なお、図8と図9は、それぞれフロントガラス奥行き $W = 0$ mm とルーフ高さ $R = 0$ mm のときの確率の変化である。図中の曲線は主観評価の各値の閾値を示しており、例えば図8の $R = 0$ において、赤い点線は主観評価が5未満 ($= 1, 2, 3, 4$) となる確率は約0.67であることを示す。同様に、紫の点線で示された4未満 ($= 1, 2, 3$) となる確率は約0.47であり、主観評価値が4となる確率は0.20 ($= 0.67 - 0.47$) となる。ルーフ高さが0 mm から100 mmに増加すると、車室空間を広い（主観評価が5以上）と評価する確率は0.328から0.953に増加した。また、フロントガラス奥行きが0 mm から200 mmに増加すると、車室空間を広い（主観評価が5以上）と評価する確率は0.328から0.520に増加した。

4. 考 察

4・1 VRによる広さ感の評価の妥当性

身長が増加すると身体各セグメントの長さが長くなるため、現実の車室空間において、身長が高い乗員ほど着座した際の視点の位置はより後方・上方に位置する。図5から、VR空間内での視点位置が身長増加に伴い

より後方・上方に位置する傾向がみられることから、実験参加者は各自の身長を反映した視点位置の調整ができていると考えられる。実験参加者の身長の最小値と最大値はそれぞれ 1545 mm と 1841 mm であり、これは日本人若年成人の 10%tile から 97.5%tile までの範囲を含んでいる（産業技術総合研究所, 2019）。乗員の視点位置の分布範囲を楕円体で表現したものをアイリプスと呼び、JIS D0021 で示されている 95%tile アイリプスの前後方向と上下方向の長さは、それぞれ 198 mm と 86 mm である（日本工業標準調査会, 1998）。本実験で計測した VR 空間内での前後方向と上下方向の視点位置の範囲はそれぞれ 231 mm と 83 mm であり、JIS D0021 のアイリプスの範囲とおおむね一致している。このことから、実験参加者全体で定量的に妥当な範囲で視点位置の調整が行われていると考えられる。

実車を用いて広さ感を計測した Reed and Schneider (1999) の報告における順序ロジスティック回帰の結果を図 10 に示す。この報告では、Prefix 社製の中型セダンのモックアップを使用し、ルーフ高さを減少させて広さ感を 5 段階（1：非常に狭い，2：狭い，3：普通，4：広い，5：非常に広い）で計測している。ルーフ高さは 0, 37.5, 75.0 mm の 3 水準である。実験参加者や使用した自動車のモデル、主観評価の水準数などの実験条件が異なるため直接的な比較はできないが、図 8 と図 10 を比較すると、定性的な傾向がおおむね一致している。図 10 より、先行研究の結果ではルーフ高さを -75.0 mm から 0 mm にして 75 mm 上昇させることで、「非常に狭い」および「狭い」と感じる確率は約 0.45 からほぼ 0 に減少し、「非常に広い」および「広い」と感じる確率は約 0.25 から約 0.95 に増加している。一方、図 8 に示した本実験の結果では、ルーフ高さを 100 mm 増加させることで「狭い（1～3）」と感じる確率は約 0.47 から約 0.02 に減少し、「広い（5～7）」と感じる確率は約 0.33 から約 0.95 に増加している。このように、本論文と先行研究において、主観評価値の確率の変化の定量的な値も似た傾向を示している。実車による実験と同等の評価が行えていることから、実空間の代替として VR 空間内で車室空間の広さ感を評価することは可能であると考えられる。

Fig. 10 Logistic regressions predicting sufficiency response levels from roof axis positions. Each line in the plots shows the probability of response less than criterion levels 2 through 5. Republished with permission of SAE International, from “Reed, M.P. and Schneider, L.W., Investigating driver headroom perception: Methods and models, SAE Technical Papers (1999), 1999-01-0893”. © SAE International. All rights reserved.

4・2 ルーフ高さとフロントガラス奥行の影響

図 6 と表 1 の結果から、ルーフ高さが増加することで広さ感が有意に増加している。したがって、実験参加者は VR 空間内での車室空間の容積の増加を知覚することができていると考えられる。また、ルーフ高さが 50mm まではフロントガラス奥行き増加により広さ感が増加する傾向がみられる。統計的な有意性はみられなかったが、フロントガラスの領域を拡大して視界を広げることは広さ感を増加させる傾向があると考えられる。ルーフ高さとフロントガラス奥行きの影響を比較すると、ルーフ高さを増加させた場合の方が車室空間を広いと感じる確率が大きく改善されることから、ルーフ高さは広さ感に比較的強い影響を与えると予想される。

ルーフ高さが 100 mm の条件では、フロントガラス奥行きを増加させても広さ感が増加せず、ほぼ一定となっている。無理のない範囲の眼球・頭部運動により注視できる視野範囲を安定注視野といい、上方向が約 20°～30°、

下方向が約 $25^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 、水平方向が約 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ とされている(畑田, 2006). 図1のYZ平面(自動車の側面)において, フロントガラスの上縁(点B)と各実験参加者の初期視点位置を結ぶ線分がXY平面(水平面)となす角(以下, 仰角 θ)の平均値を図11に示す. なお, 図11中の誤差線は標準偏差を表す. 仰角 θ はルーフ高さとフロントガラス奥行き増加に伴い単調に増加し, ルーフ高さが100mmの条件では $\theta = 19^{\circ} \sim 25^{\circ}$ となっており, フロントガラスの上縁が安定注視野の境界付近に存在していると考えられる. このため, ルーフ高さが高くなるとフロントガラス上縁が上方へ移動して安定注視野の境界付近に位置するようになり, フロントガラス奥行きを増加させてもその変化を知覚しにくくなったために広さ感が変化しなかったと考えられる.

以上の内容から, 広さ感を増加させるためにはルーフ高さを増加させて車室空間の容積を増加させる方が望ましいと考えられる. フロントガラス奥行きを増加させることも広さ感を増加させる多少の効果が期待できるが, ルーフ高さと比較すると影響力は小さいと予想される. また, 本論文の結果から, 広さ感の改善にフロントガラス奥行きを使用する場合は, 乗員の安定注視野を考慮する必要があることが示唆された.

Fig. 11 Average elevation angle from eye point to front edge of windshield. The error bars represent the standard deviations. The elevation angle increased with increase of the roof height and windshield depth.

5. 結 言

本論文では, VR空間内で提示する車室空間の設計変更が主観的な広さに与える影響について検討することを目的として実験を行った. 具体的には, 既存の自動車のルーフ高さとフロントガラス奥行きを変化させたCGモデルを作成し, HMDを装着した実験参加者にVR空間内での運転席からの視界を提示して広さ感を計測した.

計測したデータに順序ロジスティック回帰を適用し, その結果を実車のモックアップを用いて実空間で広さ感を計測した先行研究(Reed and Schneider, 1999)の結果と比較したところ, 主観評価値の確率の変化が定量的におおむね一致していた. このことから, 実空間の代替としてVR空間内での車室空間の広さ感を評価することが可能であると判断した. ルーフ高さとフロントガラス奥行き増加に伴い広さ感が増加したが, ルーフ高さが高くなるとフロントガラス奥行きを増加させても広さ感が増加しなかった. これは, ルーフ高さが高くなるとフロントガラスの上縁が実験参加者の視界から外れていき, フロントガラス領域の拡大を知覚しにくくなったことが原因だと予想される. また, 順序ロジスティック回帰により, 広さ感の各評価値をとる確率と車室空間の制御因子(ルーフ高さとフロントガラス奥行き)との関係を定式化した. このように, VRを用いた車室空間の広さ感の評価が実空間とおおむね一致することを確認した上で, ルーフ高さとフロントガラス奥行きが広さ感に与える影響を定量的に評価した.

本論文で得られた結果は, 対象とした実験参加者と車種に対する結果であることに注意を要する. また, フロントガラスの角度やAピラーの形状など, 今回の実験で対象としなかった車室空間の設計因子が広さ感に与える影響についても検討が必要である. さらに, 本実験ではVR空間内の自動車の周囲の画像を静止画としたが, ステアリングの操作と連動して周囲の画像を変化させ, 運転時に近い条件で評価を行うことが望ましいと考えられる.

謝 辞

本実験の実施にご協力いただいた宮崎太志 氏（金沢大学（当時））に感謝の意を表する。

文 献

- Bordegoni, M. and Caruso, G., Mixed reality distributed platform for collaborative design review of automotive interiors, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol.7, No.4 (2012), pp. 243–259.
- Borrego, A., Latorre, J., Alcañiz, M. and Llorens, R., Comparison of Oculus Rift and HTC Vive: Feasibility for virtual reality-based exploration, navigation, exergaming, and rehabilitation, *Games for Health Journal*, Vol.7, No.3 (2018), pp.151–156.
- Borsci, S., Lawson, G. and Broome, S., Empirical evidence, evaluation criteria and challenges for the effectiveness of virtual and mixed reality tools for training operators of car service maintenance, *Computers in Industry*, Vol.67 (2015), pp.17–26.
- Gui, C., Bai, J. and Zuo, W., Simplified crashworthiness method of automotive frame for conceptual design, *Thin-Walled Structures*, Vol.131 (2018), pp.324–335.
- 畑田豊彦, 三次元映像と人間の心理物理的効果, *日本画像学会誌*, Vol.45, No.3 (2006), pp.262–269.
- Hiamtoe, P., Steinhardt, F., Köhler, U. and Bengler, K., Subjective and objective evaluation of sense of space for vehicle occupants based on anthropometric data, *Work*, Vol.41, No.SUPPL.1 (2012), pp.252–257.
- 日本工業標準調査会, JIS D0301 自動車室内寸法の測定方法 (1982).
- 日本工業標準調査会, JIS D0021 自動車の運転者のアイレンジ (1998).
- Lawson, G., Salanitri, D. and Waterfield, B., Future directions for the development of virtual reality within an automotive manufacturer, *Applied Ergonomics*, Vol.53B (2016), pp. 323–330.
- Li, X., Yi, W., Chi, H.-L., Wang, X. and Chan, A.P.C., A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety, *Automation in Construction*, Vol.86 (2018), pp.150–162.
- 前田和宏, 自動車における空力開発と取り組み動向, *日本風工学会誌*, Vol.36, No.3 (2011), pp.242–249.
- 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.
- 美記陽之介, サイエンス&デザインテクノロジー編, 自動車室内空間における広さ感への物理空間と視覚心理効果の関係, 五感で捉える自動車内装・室内空間の快適化技術大全：感覚の定量化, 材料技術, デザイン, 評価技術 (2013), pp.181–188.
- 産業技術総合研究所, AIST 人体寸法データベース 1991-92, available from <<https://unit.aist.go.jp/hiri/dhrg/ja/dhdb/91-92/data/list.html>>, (参照日：2019年6月3日).
- Ozsoy, B., Ji, X., Yang, J., Gragg, J. and Howard, B., Simulated effect of driver and vehicle interaction on vehicle interior layout, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol.49 (2015), pp.11–20.
- Parkinson, M.B. and Reed, M.P., Optimizing vehicle occupant packaging, *SAE Technical Papers* (2006), 2006-01-0961.
- Reed, M.P. and Schneider, L.W., Investigating driver headroom perception: Methods and models, *SAE Technical Papers* (1999), 1999-01-0893.
- Society of Automotive Engineers International, J1100: Motor Vehicle Dimensions (2009).
- 自動車技術会, 自動車技術ハンドブック 人間工学編 (2016a), pp.91–289.
- 自動車技術会, 自動車技術ハンドブック 設計 (デザイン・車体) 編 (2016b), pp.27–49.
- Sportillo, D., Paljic, A. and Ojeda, L., Get ready for automated driving using virtual reality, *Accident Analysis and Prevention*, Vol.118 (2018), pp.102–113.

References

- Bordegoni, M. and Caruso, G., Mixed reality distributed platform for collaborative design review of automotive interiors, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol.7, No.4 (2012), pp. 243–259.
- Borrego, A., Latorre, J., Alcañiz, M. and Llorens, R., Comparison of Oculus Rift and HTC Vive: Feasibility for virtual reality-based exploration, navigation, exergaming, and rehabilitation, *Games for Health Journal*, Vol.7, No.3 (2018), pp.151–156.
- Borsci, S., Lawson, G. and Broome, S., Empirical evidence, evaluation criteria and challenges for the effectiveness of virtual and mixed reality tools for training operators of car service maintenance, *Computers in Industry*, Vol.67 (2015), pp.17–26.

- Gui, C., Bai, J. and Zuo, W., Simplified crashworthiness method of automotive frame for conceptual design, *Thin-Walled Structures*, Vol.131 (2018), pp.324–335.
- Hatada, T., 3D display and human visual psychophysical effect, *Journal of the Imaging Society of Japan*, Vol.45, No.3 (2006), pp.262–269 (in Japanese).
- Hiamtoe, P., Steinhardt, F., Köhler, U. and Bengler, K., Subjective and objective evaluation of sense of space for vehicle occupants based on anthropometric data, *Work*, Vol.41, No.SUPPL.1 (2012), pp.252–257.
- Japanese Industrial Standards Committee, JIS D0301 Measuring method of automobile body interior dimensions (1982) (in Japanese).
- Japanese Industrial Standards Committee, JIS D0021 Eye range of drivers for automobiles (1998) (in Japanese).
- Lawson, G., Salanitri, D. and Waterfield, B., Future directions for the development of virtual reality within an automotive manufacturer, *Applied Ergonomics*, Vol.53B (2016), pp. 323–330.
- Li, X., Yi, W., Chi, H.-L., Wang, X. and Chan, A.P.C., A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety, *Automation in Construction*, Vol.86 (2018), pp.150–162.
- Maeda, K., Development of automotive Aerodynamics and approach trend, *Wind Engineers, JAWE*, Vol.36, No.3 (2011), pp.242–249 (in Japanese).
- Matsuo, N., Fujimoto, K. and Hasegawa, K., Development of quantitative evaluation technique of interior roominess, *SUBARU Technical Review*, Vol.37 (2010), pp.87–91 (in Japanese).
- Miki, Y., Science & Technology ed., Relationship between physical space and visual psychological effect for space perception in automobile interior, *Technologies for comfort of automobile interior and space captured by the five senses: Sensory quantification, material technology, design, and evaluation technology* (2013), pp.181–188 (in Japanese).
- National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST Database on anthropometric dimensions 1991-92, available from <<https://unit.aist.go.jp/hiri/dhrg/ja/dhdb/91-92/data/list.html>>, (accessed on 3 June, 2019) (in Japanese).
- Ozsoy, B., Ji, X., Yang, J., Gragg, J. and Howard, B., Simulated effect of driver and vehicle interaction on vehicle interior layout, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol.49 (2015), pp.11–20.
- Parkinson, M.B. and Reed, M.P., Optimizing vehicle occupant packaging, *SAE Technical Papers* (2006), 2006-01-0961.
- Reed, M.P. and Schneider, L.W., Investigating driver headroom perception: Methods and models, *SAE Technical Papers* (1999), 1999-01-0893.
- Society of Automotive Engineers International, J1100: Motor Vehicle Dimensions (2009).
- Society of Automotive Engineers of Japan, *Automotive engineering handbook: Ergonomics* (2016a), pp.91–289 (in Japanese).
- Society of Automotive Engineers of Japan, *Automotive engineering handbook: Design (design and car body)* (2016b), pp. 27–49 (in Japanese).
- Sportillo, D., Paljic, A. and Ojeda, L., Get ready for automated driving using virtual reality, *Accident Analysis and Prevention*, Vol.118 (2018), pp.102–113.