

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04737

研究課題名（和文）3次元輝度マッピングによる空間ボリューム予測システム構築と設計ツール開発

研究課題名（英文）Development of the estimation and design system for volume perception using 3D luminance mapping method

研究代表者

吉澤 望（YOSHIZAWA, NOZOMU）

東京理科大学・理工学部建築学科・教授

研究者番号：40349832

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：光環境と空間サイズが開放感に与える影響を調査するため、開放感を評価し数値化させる被験者実験を、容積の大小や光環境、開口の有無などが異なる空間で行った。人の目に集まる視覚的な空間情報として輝度情報と距離情報があげられるが、被験者の視点から網羅的に取得した輝度情報と距離情報を統合的に3次元輝度マッピングとしてデータ処理し、被験者実験の評価値と分析することで、開放感を定量的に求める予測式を導出した。また、今後の開放感評価研究や実際の設計に活かすために有効である、VR内での開放感の解析や、評価ツールの整備を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

利用者が建築空間を快適かつストレスなく過ごせるためには適切な開放感が必要であるが、物理的な容積や開口の大きさは、敷地面積や容積率・環境維持コストなどの条件によって有限であり、特に都市部では不足しやすい。本研究の成果である開放感の予測式を使用すると、限られた条件の中で光環境や開口をどのように調整すれば、少しでも大きな開放感を得られるかを定量的に評価することが可能であり、実際の設計において3Dモデルと光環境のシミュレーションを用いて開放感を予測することで、空間構成・開口計画や照明計画の改善に寄与することができる。

研究成果の概要（英文）：To study about the effect of lighting environment and dimensions of room on spaciousness, we conducted subjective experiment to quantity spaciousness by changing the volume, lighting environment and condition of openings in different spaces. The important visual information of the room perceived with the occupant's eyes is the luminance image and the distance information. By combining both data of luminance and distance into one integrated data and analyzing it with the result of experiments, we derived the formula to estimate spaciousness of the room. In parallel, we studied about the spaciousness in VR and developed evaluation tool set, in order for the spaciousness estimation method to be widely used for research and practical design development.

研究分野：建築環境および建築設備関連

キーワード：開放感 3次元輝度マッピング 奥行き把握 空間ボリューム知覚 光環境 VR シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

建築物の省エネルギー性能の追求と並行して、働き方改革に伴う生産性向上や健康経営も求められるようになり、WELL 認証のような快適性や健康性能にまで踏み込んだ環境評価システムがより注目を集めるようになってきている。利用者が快適かつストレスなく過ごせる環境を維持するために視覚的に必要な要件としては、適切な明るさだけでなく、適切な開放感(本研究では、人が感じる空間の容量感、という定義とした)を持つ空間を確保する必要がある。もし適切な開放感が確保できない場合、圧迫感や閉塞感により利用者の心理的快適性が損なわれ、深刻な場合にはストレスの増大・健康への悪影響が懸念される。

空間の容積感の知覚には物理的な容量が影響するが、敷地面積や容積率、維持コストなどの各種要件の制約によって、ある空間に利用できる物理的な容量は有限である。すなわち、快適かつ健康的な環境を生み出すには、制限のある物理的容量のなかで十分な開放感を得ることが必要であり、そのためには開放感に影響を与える、空間の容量や形状、窓などの開口部、さらには空間の明暗に関わる光の総量や光の分布のコントラスト、視野内のどの部位(机上・壁・天井・窓など)の輝度が高いのかという光の局在性といった光環境の状態も加味しながら総合的に効果を予測する手法が必要である。本研究では、この必要性に対し、視覚的な情報として近年、空間の明るさ評価などで、照度に代わって観察者が直接受け取る光の量を示すものとして用いられている輝度画像と、観察者が視差などによって知覚している奥行きを組み合わせることで、両者が複合的に空間認識に与えている影響を総合的に定量評価することができると考えた。

2. 研究の目的

本研究では前章の背景を受け、人の目に集まる視覚的な空間情報を集約して輝度と奥行きの情報を統合的に解析することで、面的な輝度分布だけではなく、室内の壁床天井や家具などの各対象面までの距離を考慮した開放感の定量的な説明を行うこと、それによって実際の設計において空間構成・開口計画や照明計画の改善に寄与することを目的とする。

そのための中間目標として、開放感の定量モデル構築のために、輝度と奥行きを統合して解析するための測定技術とデータ処理方法の開発と、安定した被験者実験のための比較基準や測定する室容積範囲の規定などプロトコル策定、また、実際の設計に寄与するために、輝度と距離情報の統合的な測定とデータ処理の方法や比較基準等を実務設計者でも使えるようなツール化を行う。

3. 研究の方法

光環境と空間サイズが開放感に与える影響を調査するため、空間を体験させてその開放感を評価し数値化させる被験者実験を、多様な空間(容積の大小、異なる光環境、開口の有無)を使い、それぞれの空間あるいは複数の空間の組み合わせで行った。

各実験空間に対して、被験者の視点から観察方向に対して魚眼カメラによる輝度画像撮影とあわせて距離取得を同じ解像度で行いデータ化することで統合して解析できるようにし、そのデータからのモデル式による算出値と被験者実験の評価値とで回帰分析を行って実験毎の予測モデルの最適化を行った。さらに実験毎に発生する差異を補正する式を求めて適用することで実験結果を統合し、すべての実験空間・照明条件についての開放感予測式を導出した。

4. 研究成果

(1) 無窓空間における開放感予測式 作業面平均照度や平均輝度と開放感

空間の明るさと開放感の関係について、明るいほど開放感が増すという仮説を検証した。照明が全体に点灯している場合には、既往研究でも示されていた通り、作業面平均照度が高ければ開放感が高くなることが示された。さらに、観察者が直接観察できる値である平均輝度のほうが照度よりも説明力が高く、平均輝度が高ければ開放感が高くなることが示された。図1の赤いマーカーと近似直線は、この結果を示している。

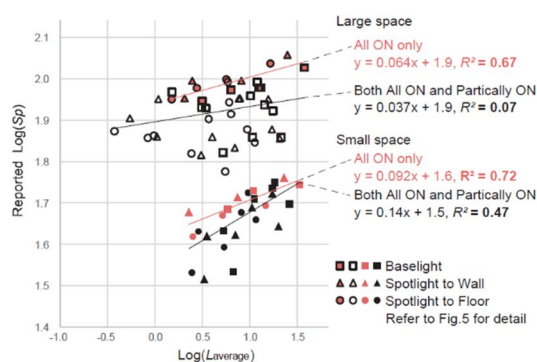


図1 平均輝度 $L_{average}$ と開放感 Sp

「暗所欠損可視容積」の導入と開放感との関係

まずは、既往研究で用いられていた空間の物理的容量に対して、「可視容積」がより説明力が高いことが示された。可視容積とは、被験者の視点から前方で直接見える空間の容積であり、図2左のように柱などで遮蔽された裏側の見えない空間は除いている。この値は図2右のように、被験者の視点を頂点とし、室内要素の各面を底面とした四角錐の積分として算出できる。さらに、実験結果を詳細に検討したところ、空間の中で平均輝度に比べて一定の比率以下である部分について、開放感が減少しているという現象が見られたため、この効果を計算モデルに反映するために「暗所欠損可視容積」を導入した。

「暗所欠損可視容積」は、前述の積分計算をする際に一定の値より輝度の小さいピクセルに相当する四角錐についてその輝度値の小ささに応じて体積を割り引いてから加算するようにした可視容積である。この値は、平均輝度に比べて暗いピクセルが多いほど、またそのピクセルの配置も被験者からの距離が近い部分よりも遠い部分が暗いほど低くなる。

この と の両方の影響を反映した計算モデルによる算出値と開放感の関係を示したものが図4であり、平均輝度と暗所欠損可視容積の両方を用いることで、容積の違い、光環境の違いによる開放感への影響をあらわしている。C01のように空間全体の輝度が高い光環境の場合に開放感が最も高く、次いで手前が暗くて奥が明るいA12のような光環境で開放感が高い。C07のように手前が明るく奥が相対的に暗い光環境では、同じ容積の条件の中では開放感が小さくなる。D09のように容積が小さい場合にも当然開放感は小さくなるが、このように容積の異なる条件についても、一つの計算モデルで開放感への影響を評価できることを示した。また、この計算モデルによる開放感の予測式は全ての実験について有効であった。

実験結果を統合した開放感算出式の導出

複数の実験の解析を進めると、その実験に含まれる条件の差異の大小が被験者の回答幅に影響を与えており、それにより各実験から導かれる回帰式が異なる可能性が示された。この実験条件の幅に起因すると考えられる影響を排除してすべての実験条件を統合したものが図5である。これにより、ことなる実験で使用した空間の開放感を統合算出式によって1つの基準空間との比較で検討できるようになった。以下にその統合式を示す。

$$\text{Log}(Sp) = \frac{0.036 \cdot \text{Log}(L_{\text{average}}) + 0.48 \cdot \text{Log}(V_{\text{recog}}) - 1.10}{\text{Diff} + 0.197} + 2.00$$

Sp: 開放感

L_{average}: 平均輝度

V_{recog}: 暗所欠損可視容積

Diff: 実験に含まれる条件の差を表す値

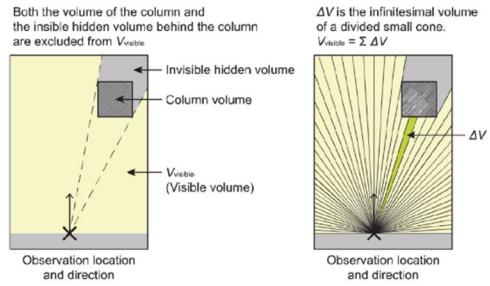


図2 可視容積とその積分計算の概念図

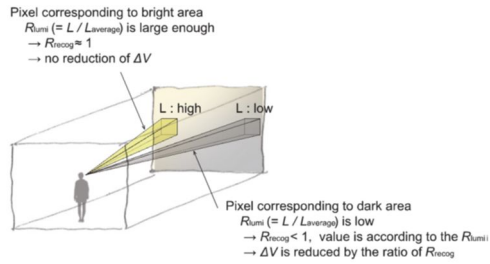


図3 暗所欠損可視容積の概念図

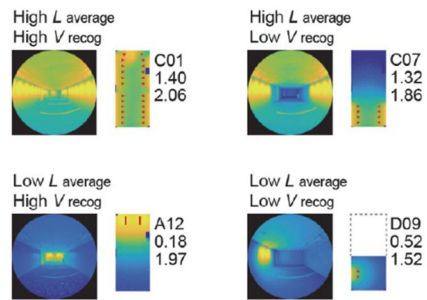
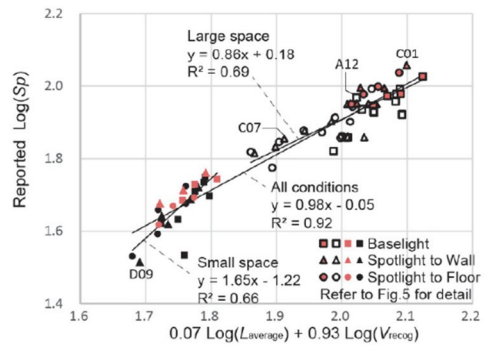


図4 平均輝度・暗所欠損可視容積と開放感

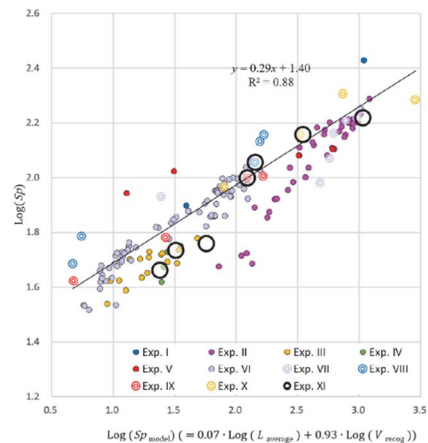


図5 開放感と統合算出式との回帰分析

(2) 有窓空間における開放感予測式

開口のある空間では一般的に、窓を通して得られる効果によってより高い開放感が得られることが予想された。実験では、窓の遮蔽パターンと室内の照明、仕切りによる室容積の組み合わせによる条件を評価させた。この結果をもとに、から開放感計算モデル値の算出を行う際に、図6のように、窓面に相当するピクセルに対する計算 (Sp_{model_out}) をと、それ以外の内部壁面等に相当するピクセルに対する計算 (Sp_{model_in}) を分けて計算し、それぞれに立体角放射率をかけたうえで加重合計することで窓部分の影響を加味した開放感計算モデルを求めることができた。この計算モデルを以下に、また回帰分析図を図7に示す。

$$Sp_{model-2} = Sp_{model_in} \cdot U_{in} + 4.9 \cdot Sp_{model_out} \cdot U_{out}$$

Sp_{model_out} : 窓面に相当するピクセルの Sp_{model}

Sp_{model_in} : 窓面以外に相当するピクセルの Sp_{model}

U_{out} : 窓面の立体角放射率

U_{in} : 窓面以外の立体角放射率

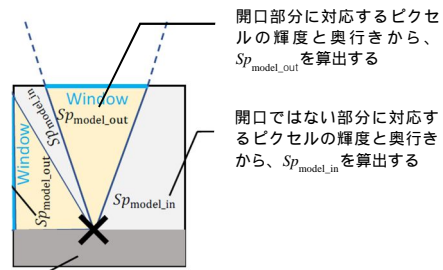


図6 有窓空間での Sp_{model} 算出

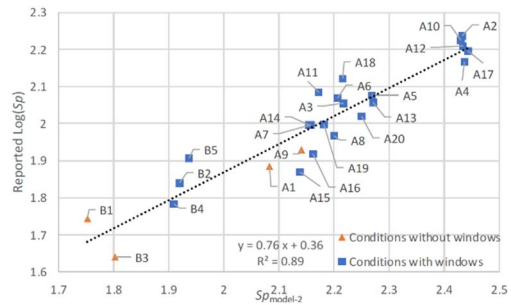


図7 有窓空間での開放感計算モデル回帰分析

(3) VR空間の開放感

開放感の被験者実験では、条件として提示する空間を用意することには大きなコストがかかる上、物理的に離れた空間同士を比較させることは現実的ではないため、これらの問題を解決する方法としてヴァーチャルリアリティ (以下 VR) の活用が考えられる。VR を用いることは開放感の実験にかかるコストを大きく低減し、比較できる空間を容易に増やすことができるが、VR空間は完全な再現性はないので実空間と比較してどのように開放感が異なるかを検証しておく必要がある。図8はある空間の開放感回答値が、実空間を基準とした時 (グレー) と、その実空間を再現した VR空間を基準とした時 (白) の比較を示しており、実験に使用するだけの再現性を備えていることが確認できた。また、VR空間は再現元の実空間に比べて開放感が1割程度小さくなる空間が5種類の空間のうち1つあることも確認された。

(4) 評価ツールの整備

開放感の研究を設計実務に寄与できるようにするために、評価ツールや基準の整備が必要であり、輝度画像取得・距離情報取得の方法、そのデータを統合したものである「3次元輝度マッピング」の情報処理についてまとめた。また、今後の安定した評価のためと、我々以外でも同じ比較基準として使えるようにするため、実験基準用 VR空間を評価対象の空間サイズに合わせて3種類作成した。そのうち $39m^3$ から $622m^3$ までの空間評価に使用できる基準空間のレンダリングを図9に示す。

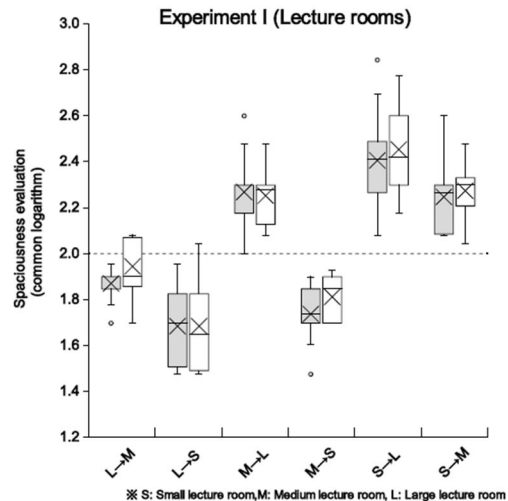


図8 実空間基準と VR空間基準の比較

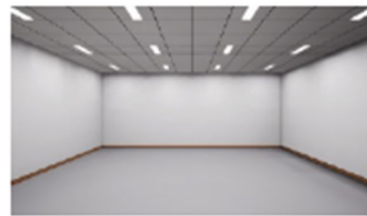


図9 実験基準用 VR空間 (レンダリング)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 山本 竜也, 三宅 博行, 山口 秀樹, 吉澤 望	4. 巻 86
2. 論文標題 建築内部空間における光・視環境を考慮した開放感の定量評価研究（その1）：HMDによるVRを用いた無窓空間における開放感評価の妥当性検証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 451-461
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aije.86.451	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 三宅 博行, 山本 竜也, 山口 秀樹, 吉澤 望	4. 巻 87
2. 論文標題 建築内部空間における光・視環境を考慮した開放感の定量評価研究（その2）：平均輝度と暗所欠損可視容積による無窓空間の開放感計算モデル	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 62-73
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aije.87.62	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Miyake, H., Okada, M., Yamamoto, T., Yamaguchi, H., Yoshizawa, N.	4. 巻 -
2. 論文標題 QUANTIFICATION OF THE EFFECT OF LIGHTING ENVIRONMENT ON SPACIOUSNESS OF INTEIROR SPACE	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of CIE Conference 2021	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 三宅博行, 岡田雅大, 山本竜也, 山口秀樹, 吉澤望	4. 巻 87
2. 論文標題 建築内部空間における光・視環境を考慮した開放感の定量評価研究（その3）：複数の実験結果の比較による無窓空間における開放感予測式の統合方法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyake,H., Yamamoto,T., Yamaguchi,H., Yoshizawa,N.	4. 巻 -
2. 論文標題 EFFECTS OF LIGHTING ON PERCEPTION OF SPACIOUSNESS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of CIE Conference 2019	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 三宅博行・西原尚輝・岡田雅大・山本竜也・山口秀樹・吉澤望
2. 発表標題 ヘッドマウントディスプレイ上に再現したバーチャル空間と実空間に対する開放感の比較
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会 (北海道)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S Nishihara, M Okada, H Miyake, H Yamaguchi, N Yoshizawa
2. 発表標題 Calculation model of spaciousness in rooms with windows -Experimental procedure for spaciousness evaluation using VR-
3. 学会等名 LIGHT SYMPOSIUM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本竜也・三宅博行・山口秀樹・吉澤望
2. 発表標題 HMD型VR装置を用いた室内空間における広がり感評価の妥当性検証
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会 (関東) 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本竜也・三宅博行・山口秀樹・吉澤望
2. 発表標題 コンピュータ・シミュレーションにおける3次元輝度マッピング手法の構築とその応用
3. 学会等名 2019年度日本建築学会全国大会（北陸）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuya Yamamoto, Hiroyuki Miyake
2. 発表標題 RTRACE with Equisolid projection in Environmental Psychology studies
3. 学会等名 The 18th International Radiance Workshop（国際学会）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

javascript: onSave()

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山口 秀樹 (YAMAGUCHI HIDEKI) (60411229)	国土技術政策総合研究所・建築研究部・主任研究官 (82115)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三木 保弘 (MIKI YASUHIRO) (90356014)	国土技術政策総合研究所・住宅研究部・住宅情報システム研究官 (82115)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関