物体密度と注視方向が距離知覚に与える影響

上村　恵子[1]・吉村　貴克[2]・菊池　佳奈[3]・大脇　崇史[4]・町田　貴史[5]

[1]非会員（株）豊田中央研究所 協働知性研究領域（〒480-1192 愛知県長久手市横道 41-1）
E-mail:uemura@mosk.tytlabs.co.jp (Corresponding Author)

[2]非会員（株）豊田中央研究所 協働知性研究領域（〒480-1192 愛知県長久手市横道 41-1）
E-mail:yoshimura@mosk.tytlabs.co.jp

[3]正会員（株）豊田中央研究所 協働知性研究領域（〒480-1192 愛知県長久手市横道 41-1）
E-mail:kana_kikuchi@mosk.tytlabs.co.jp

[4]非会員（株）豊田中央研究所 協働知性研究領域（〒480-1192 愛知県長久手市横道 41-1）
E-mail:t-owk@mosk.tytlabs.co.jp

[5]非会員（株）豊田中央研究所 ｸﾗｳﾄﾞｲﾝﾌｫﾏﾃｨｸｽ研究領域（〒480-1192 愛知県長久手市横道 41-1）
E-mail: machida@mosk.tytlabs.co.jp

歩行者が疲れにくい街路設計において、本研究では街路空間の距離知覚に影響を及ぼす設計要素について明らかにするため，街路上の物体密度および歩行時の注視方向と距離知覚の関係をVR実験により検証した．街路樹の配置間隔と注視方向を変数として歩行距離知覚への影響を調査した結果，街路樹間隔が狭い場合に距離は長く推定され，注視方向については有意な結果はないことを確認した．この結果から街路空間において距離を長く感じさせないためには，街路樹間隔を狭くしないような設計が必要であることが分かった．また，街路樹間隔が速度知覚に影響を及ぼしている可能性が示唆されたことから，歩行速度の誘導による健康促進が期待できる．

Key Words: *distance perception, VR experiment, street design, walkability*

1. 背景と目的

近年，街路空間を単なる通過道路から居心地の良い“歩行者中心”の空間へと再構築する取り組みが各地で進められており，東京駅前広場と丸の内仲通り，姫路駅北前広場と大手前通りなどのように，特に中心市街地の駅前エリア等を広い範囲にわたって歩行空間化する取り組みが見られるようになった．

これらの取り組みの多くは、ロータリーや駐車場など車のためのインフラを移転したり、車線を減らしたりするなどして、歩行者のための空間を確保し、芝生広場や、椅子やテーブル等のストリートファニチャを配置している。

当然のことながら、このように車の空間を削っていけば、これまで作り上げてきた移動の利便性は損なわれる。車で直接アクセスできていた駅にも、長い歩道を歩かなければならなくなる可能性がある。そのため、車が排除されることによる居心地の良さや安心感と、移動の利便性をバランスさせる工夫が重要となる。我々は、この工夫の一つとして、視覚的に歩く距離を遠く感じさせない街路デザインを模索している。

距離知覚に関する既往研究から，距離知覚は大きく分けて視覚的距離知覚（ある視点から静止した状態で見た時の距離の知覚）と歩行距離知覚（歩いて移動した距離に関する知覚）の区分があると考えられる．視覚的距離知覚に関する知見では例えば，市原ら[1]の研究で壁面に水平方向の縞柄がある空間で，静止視点場から見た場合に奥行が長く感じられることが確認されている．歩行距離知覚に関する知見では，沿道環境に関してJan Gehl[2]が無地の長い壁をもつような大型店舗や水平性の強いデザインの建物は距離を強調し長く感じさせ，それに対して100ｍあたりに20軒の異なる店舗を配置したり，建物1Fの外観に柱などの垂直方向のデザインを施すことで歩行距離が短く感じられると述べている．これはNguyenら[3]の研究で，街路環境のベンチ・樹木やストリートファニチャ等の多種類の要素が配置されたような環境密度が高い街路の場合に，移動距離を短く推定した結果とも一致する．米谷ら[4] の研究では商業地や公園地区などの歩道

を対象とした歩行実験で，見るものの多さや賑やかさが意識距離に大きく影響していることが示されている．馬淵ら[5] の研究で無地の床面と対面の壁のみのシンプルな空間内に置かれた物体までの距離を歩いて評価するVR実験で，視野角の大小は距離感の精度には影響しない結果を得ている．Redlickら[6]の研究ではオプティカルフローが歩行時の距離知覚に影響を与えることが示されている．加藤ら[7] はトンネル内の歩行を模擬した映像を提示し，トレッドミル上での歩行実験において，視野中心部分の視覚刺激のみが知覚応答に影響を与える結果を得ている．

既往研究[1)-4)]では，静止および歩行時の距離知覚に影響を与える因子が物体密度だという仮説を述べている．一方，既往研究[5)-7)]では視覚刺激が影響する視野の範囲や場所について述べられているが，視覚刺激の視野内での方向すなわち注視方向が歩行距離知覚に影響する可能性も想起される．しかしながら，実環境を想定した既往研究[2)-4)]では，物体密度と注視方向それぞれの効果について明確には分離して論じられていない．

そこで，本研究ではNguyenらの研究をベースとして，歩行距離知覚に関するVR実験を行う．仮説としては次の2つを挙げる．

1. 物体配置間隔と歩行距離知覚には相関がある
2. 歩行時の注視方向と距離知覚には相関がある

本研究の貢献は，(1)歩行距離知覚への影響が物体密度と歩行時の注視方向を変数とした実験により，それぞれの効果を明確にしたこと，(2)現実環境に適用できるよう現実に近い街路環境での実験を設計したことの2点が挙げられる．

2. 実験方法

歩行空間を構成する主なデザイン要素については，沿道建物，路面，街路樹，ストリートファニチャなどが挙げられるが，今回は密度による印象の違いが分かりやすい「街路樹」に着目し，街路樹間隔を変化させた場合の印象を評価する．詳細について以下に述べる．

(1) 主観データの収集方法

実験は以下の手順に従って実施した（**図-1**）．

[①学習] 被験者はVR実験環境を65m歩行する約1分の映像を視聴する

[②再現] ①の映像と同じ距離だと判断するまでVR実験環境内を進み，そのときの距離を主観データとして記録する

学習時のVR実験環境の街路樹間隔は5m, 10m, 30mの3水準，注視方向は0°，15°，30°の3水準設定した．①学習では街路樹間隔と注視方向を組み合わせた9条件から1つを提示し，②再現では街路樹間隔10m，注視方向0°の条件のみを毎回提示した．被験者は9条件すべてを実施した．

街路樹間隔および注視方向の計9試行の順番は，直前の条件に回答が影響されて評価が偏ることのないように，次の3つの規則に従って各被験者でランダムになるように設定した．

[規則1] 初期設定として，各試行にランダムにIDを付与する（**表-1**）

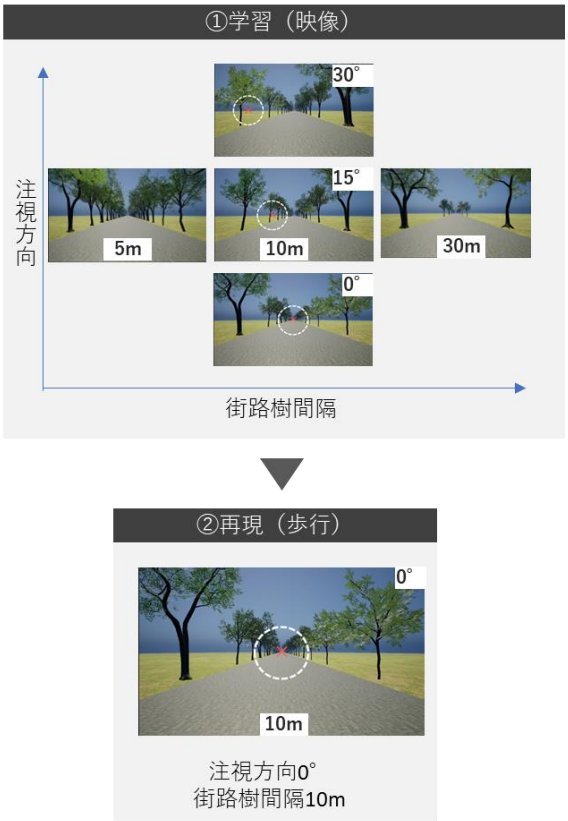


図-1 VR 実験の手順

表-1 初期設定

条件		ID
街路樹間隔(m)	注視方向(度)	
5	0	1
	15	4
	30	6
10	0	5
	15	2
	30	8
30	0	9
	15	7
	30	3

[規則2] IDに従って昇順に試行するが，被験者毎に開始するIDを1つずつずらす（9まで到達すれば1に戻る）（表-2）

[規則3] 9試行を3つのグループにわけ，グループ内でもランダムに実施する

被験者の数が多い場合に同じ試行パタンが増えることを防ぐため，規則2だけでなく規則3も適用した．

(2) VR実験環境の構築

a) 実験環境の設定

VR実験環境はEpic Games社のUnreal® Engineで作成した．図-2は上空から見たVR実験環境を示している．400m×250mのフィールド内で歩道は全長400m，幅員10mとした．被験者が視聴する歩行映像は歩道の10m地点から75m地点までの65mの距離とした．街路樹は高さ約7～12mの高木を，並木の最終地点が移動距離の手掛かりにならないように前方視野の消失点まで両側に並べた．街路樹はキハダやハルニレ，カエデなどの3Dモデルがランダムに6種類出現するようにし，枝ぶりなどの見え方が異なるように街路樹の向きもランダムに回転させて配置した．

b) 歩行条件の設定

被験者はMeta Quest製のOCULUS RIFT SまたはMeta Quest2のHMD（ヘッドマウントディスプレイ）とコントローラを装着し，全試行を椅子に座った状態で実施した．再現時にはコントローラのAボタンを押し続けることでVR実験環境内を前方に移動することが可能で，後退はできない設定とした．制限時間は設けず，先に視聴した歩行映像と同じ距離だと判断した地点でAボタンの押下を止め，Bボタンを押すことで評価を完了する．HMDを付けた状態で手元のABボタンを確認するのは困難であり，誤ってBボタンを押して1歩も歩かないうちに評価終了するのを防止するために，最初の10mまでの区間はAボタン以外のボタンは無効となるように設定した．歩行速度は厚生労働省の報告資料[8]に従い，学習と再現の双方とも普通歩行1.1m/秒に設定した．

歩行中に注視する方向は，被験者の前方に赤いクロス（×）を出現させてその方向を眺めるように指示した．この時，体の向きは進行方向のまま，頭だけをクロスの方向に向けて景色を眺めることとした．クロスの大きさは縦横1.5mで，被験者の前方10mの位置にクロスの中心が1.5mの高さになるように歩行開始から5秒間のみ出現させた．被験者はクロスが消えた後も頭の向きは変えずに，最初に指示された方向を眺めながら進むよう指示した．注視方向条件における被験者視点の画像例を図-3に示す．

なお，被験者がVR実験環境内での操作や評価方法に慣れるための練習として，本番前に学習と再現の1試行を実施した．練習に使用した条件は，街路樹間隔が10m，注視方向は一番深い角度の30°とした．また，3試行あたりに1回1分間の休憩を入れて，被験者にすべての装置を外した状態で目を休めるよう指示した．

表-2 被験者毎の設定

被験者	[規則2] A	[規則2] B	[規則2] C	[規則3] A	[規則3] B	[規則3] C
IDの試行順	1	2	3	1	3	5
	2	3	4	3	2	4
	3	4	5	2	4	3
	4	5	6	6	7	7
	5	6	7	5	5	6
	6	7	8	4	6	8
	7	8	9	8	9	2
	8	9	1	7	8	1
	9	1	2	9	1	9

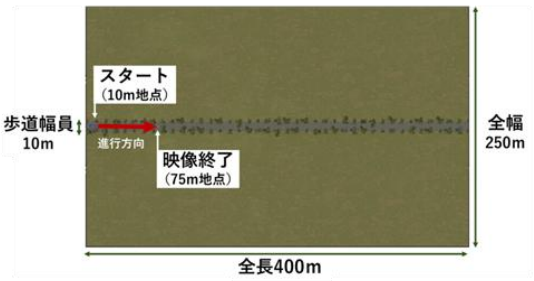


図-2 VR実験環境を上から見た全体図



3a．街路樹間隔5m，注視方向 0°



3b．街路樹間隔10m，注視方向 15°



3c．街路樹間隔30m，注視方向 30°

図-3 被験者視点の実験画像例

3. 実験結果

(1) 被験者

被験者は20～50代の日本語を母国語とする健常な男女50名で，日常において乗り物酔いをしにくい体質であることを条件として委託会社が選出を行った．各年代，男女の人数割合は**表-3**の通りである．

実験に要した時間は実験趣旨と実施手順の説明および練習を含め，1人あたり1時間程度であった．なお本実験は，㈱豊田中央研究所実験倫理審査委員会での承認（No.22A-35）を受けて実施した．

(2) 街路樹間隔の歩行距離知覚への影響

図-4に街路樹間隔における歩行距離知覚の結果を示す．学習と再現の街路樹間隔がともに10mの場合に，学習時の距離（65m）と歩行距離知覚の差が小さかった．

一方，学習の街路樹間隔が5mの場合には歩行距離知覚が長くなり，30mの場合は歩行距離知覚がわずかに短くなった．5mと30mの場合は10mの場合と比べてデータのばらつきの大きさが目立ったものの，街路樹間隔が歩行距離知覚に影響を及ぼしている可能性が見られた．

街路樹間隔の歩行距離知覚への影響について有意性を確かめるために反復測定二元配置分散分析を行った結果，街路樹間隔の主効果が認められた（$p < 0.01$）．次に多重比較法を用いた2群検定を行った結果，5mと10mの間および5mと30mの間に有意差があり（$p < 0.01$），街路樹間隔が5mの場合において歩行距離知覚が長くなることが分かった．

(3) 注視方向の歩行距離知覚への影響

注視方向における歩行距離知覚の結果を**図-5**に示す．注視方向3水準間で推定距離にほとんど差は無く，多重比較法を用いた2群検定を行った結果，どの条件においても有意差はなかった（$p > 0.05$）．

また，街路樹間隔と注視方向の交互作用を確認すると，2因子間での交互作用は認められず（$p > 0.05$），今回の条件では注視方向は歩行距離知覚に影響を及ぼさないことが分かった．

(4) 試行順の歩行距離知覚傾向への影響

9条件の試行順による歩行距離知覚の傾向への影響について**図-6**に示す．この図では，すべての被験者の各試行における歩行距離知覚を3試行ずつに分けてグラフ化した．街路樹間隔10mにおける歩行距離知覚は全体を通してばらつきは小さく，街路樹間隔5m，30mでは前半の試行では大きなばらつきが見られたものの，後半になるほどばらつきは小さいことが確認できる．また，3試行毎で歩行距離知覚の傾向に大きな違いは見られなかった．これらの結果から，直前の試行による歩行距離知覚への影響はないものと考えられる．

(5) 事後アンケート

被験者の距離判断の基準について，実験終了後にアンケートを行った．初めは街路樹の形や本数を頼りに距離を判断する人が多かった．しかし，試行ごとに街路樹の本数が変化するため基準に使えないことが分かると，試

表-3 被験者の内訳

	男性	女性
20代	6	10
30代	5	6
40代	7	6
50代	5	5
計	23	27

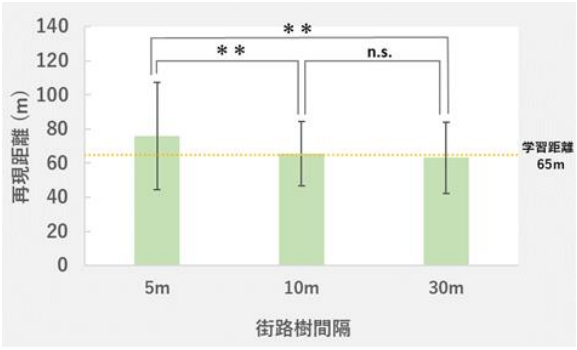


図-4 街路樹間隔との関係

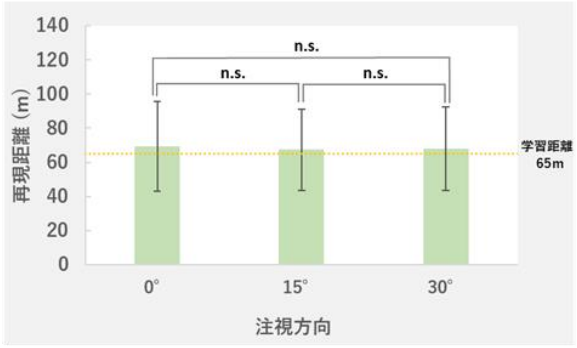


図-5 注視方向との関係

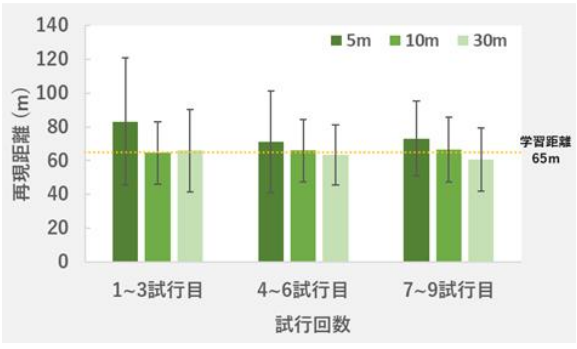


図-6 試行回数と距離推定の傾向

行途中で秒数や歩数などの経過時間に判断基準を変更した人が多く見られた．試行回数の序盤でデータのばらつきが大きかったのはこの判断基準の変更が影響していると考えられる．

また，実際は歩行速度がどの条件も同一であったにもかかわらず，「歩行速度が映像によって異なるから距離がつかみにくかった」や「街路樹が多い時は速く進んでいるように感じた」などの感想も挙げられ，知覚速度への影響が見られた．

4. 考察

今回の実験結果では，歩行距離知覚に対し，街路樹間隔は有意な影響を与えたものの，歩行時の注視方向の影響は有意ではなかった．この結果の解釈について「街路樹が多い時は速く進んでいるように見えた」というコメントをもとに考えると，街路樹間隔が狭くなることで視界を同じ物体が通り過ぎる頻度が高くなり，歩行速度が速くなったような錯覚が起こったと推察される．金ら[9]の既往研究では，上から下に一定速度で連続的に流れる水平ストライプの図形の速度を評価する実験において，その図形の間隔や幅などを小さく変えることで速度が速く感じられるという結果が述べられている．この結果からも，街路環境における単一物体の配置間隔が歩行者の知覚速度に影響を与える可能性が示唆される．

一方，注視方向の影響に対する速度知覚の解釈では，注視方向15°や30°のオプティカルフローによる知覚速度が脳内で補正され注視方向0°のオプティカルフローと同等の効果になり有意差がなかった可能性が考えられる．これについては様々な方向のオプティカルフローと速度知覚の関係を検証するためのさらなる実験が必要と考える．

次に，「距離＝速度×時間」の式に照らし合わせて解釈する．街路樹間隔が学習時に5m，再現時に10mの試行（学習時よりも再現時で街路樹間隔が広くなった場合）では，速い知覚速度で学習し，遅い知覚速度で再現することになる．このとき，学習時の歩行距離と等しくするためには長い歩行時間が必要と判断され，結果として歩行距離知覚が長くなったと推察される．同様に，学習時よりも再現時で街路樹間隔が狭くなった場合も成立する可能性があるが，今回の結果からはその効果を明らかにはできなかった．この要因として，視覚的な密度の差が小さく認識されたと考えられる．

Nguyenらの実験で，近傍の街路環境に物体が密集している環境は，まばらな環境よりも移動距離を短く推定することが示されており，我々の実験結果とは逆の結果となっている．彼らの実験環境ではベンチ，ブランコ，車や街路灯など多様な物体が配置され，街路樹も赤・黄・緑と色彩豊かである．また，街路のどこを見るかは被験者の自由で，注視方向は明らかではないという違いがある．そのため，この実験では物体密度よりも物体種類の多様性によって距離を短く知覚した可能性が示唆される．つまり，物体種類が多い場合に注視方向の物体に注意が向くことで経過時間を短く錯覚（時間知覚に影響）し，距離を短く感じさせる効果があると考えられる．街路樹の間隔が狭い場合に歩行距離知覚の長短が我々の実験結果とNguyenらの実験結果で逆転したのは，影響を及ぼす対象（速度か時間）が異なることが要因だと考えられる．

Ludwigら[10]の研究で知覚速度が実際の歩行速度に影響を与えることが示されていることから，今回の結果の活用として，視覚刺激から自身の歩行速度が速い/遅いと感じさせることで歩行速度を変化させる効果が期待できる．例えば観光地や商店街などの街路においては物体の間隔を狭くすることで，ゆっくりとした回遊を誘引できると考えられる．さらにNguyenらの知見に従えば，物体の多様性を高めることで，距離を短く感じる街路となりうる．

一方，健康づくりのためのウォーキングや速やかに目的地へ誘導するための通過道路などにおいては，物体の間隔を広くすることで自分が歩く速度を遅く認知し，無意識に速やかな歩行を誘引できる可能性がある．

5. まとめ

街路空間の歩行距離知覚に影響を及ぼすデザイン要素についてVR実験により検証した．その結果，空間内の街路樹間隔が狭い場合において距離は長く推定され，注視方向については有意な結果はないことを確認した．また，街路樹間隔が歩行者の知覚速度に影響を与えていることが示唆された．今回の結果は一定の速度で展開する景観の流れや奥行き感をVR技術によって再現したシミュレータで得られた限定的なものであり，今後は実際に歩行運動を伴うような実空間により近い歩行体験ができる実験環境での検証を実現したい．また，他の物体や空間に対しても実験を検討していきたい．

付録

本研究のVR画像はUnreal® Engine で作成した．Unreal®は，アメリカ合衆国およびその他の地域におけるEpic Games, Inc.の商標または登録商標である．Unreal® Engine, Copyright 1998 - 2023, Epic Games, Inc. All rights reserved.

参考文献

1) 市原茂，遠藤美帆：壁の縞柄の方位が室内空間の見えの大きさに与える影響について，日本官能評価学会誌，2002 年，Vol.6 No.2，pp.121-126. [Ichihara, S. and Endo, M.: The orientation of the stripes on the wall affects the apparent room size, *Japanese Journal of Sensory Evaluation*, pp. 121-126, 2002.]
2) ヤン・ゲール：人間の街, 鹿島出版会, 2014 年. [Gehl, J.: *Cities for People*, Kajima-publishing, 2014.]
3) Nguyen, T. D., Cremer, J. F., Kearney, J. K., Plumert, J. M.: Effects of scene density and richness on traveled distance estimation in virtual, *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, pp.83-86, August 2011.
4) 米谷一心，鈴木聡士，東本靖史，五十嵐日出夫：意識距離の短縮効果を有する歩行空間の創出に関する基礎的研究，地域学研究，Vol32， No.1, pp.173-187, 2001. [Yoneya, K., Suzuki, S., Higasimoto, Y., Igarashi, H.: Basic research on the creation of walking space with shortening effect of consciousness distance, *Studies in Regional Science*, Vol32, No.1, pp.173-187, 2001]
5) 馬淵大宇，吉岡陽介，藤井皓介，遠田敦，佐野友紀：没入型仮想環境における距離感の精度に影響を与える要因の検証，日本建築学会技術報告集，Vol23, No.53, pp.223-228, 2017. [Mabuchi, D., Yoshioka, Y., Fujii, K., Enta, A., Sano, T. : Verification of the influencing factors concerning the accuracy of distance perception in immersive virtual environment, *AIJ J. Technol. Des.*, Vol23, No.53, pp.223-228, 2017]
6) Redlick, F. P.: Humans can use optic flow to estimate distance of travel, *Vision Research*, Vol.41, No.2, pp.213-219, 2001.
7) 加藤典之，金子寛彦：歩行応答と知覚応答による視覚誘導性自己直線運動の知覚速度の測定―刺激形状の効果に関する検討―，光学，Vol34, No.11, pp.597-605, 2005. [Kato, N. and Kaneko, H.: Velocity of visually induced linear self-motion measured by walking and perceptual responses: consideration of stimulus size effects, *Japanese Journal of Optics*, Vol34, No.11, pp.597-605, 2005.]
8) 厚生労働省「健康づくりのための運動について」2006 年.
https://www.mhlw.go.jp/shingi/2006/07/dl/s0725-9f-42.pdf. [アクセス日: 2023 年 7 月 19 日].
9) 金顕静，野口薫：運動図形の形態的特徴が速度知覚に及ぼす影響，デザイン学研究，Vol46, No.2, pp.55-62, 1999. [Kim, H.J., Noguchi, K.: The effect of configurational characteristics of moving patterns on speed perception., *Bulletin of Japanese Society for the Science of Design.*, Vol46, No.2, pp.55-62, 1999.]
10) Ludwig,C.J.H., Alexander, N., Howard, K. L., Jedrzejewska, A. A., Mundkur, I. & Redmill, D.: The influence of visual flow and perceptual load on locomotion speed, *Attention Perception & Psychophysics*, Vol.80, No.1, 2017.

（2023. ?. ? 受付）

EFFECTS OF OBJECT SPACING AND GAZING DIRECTION ON DISTANCE PERCEPTION

Keiko UEMURA, Takayoshi YOSHIMURA, Kana KIKUCHI, Takashi OWAKI, Takashi MACHIDA

In this study, in order to clarify design elements that influence distance perception in a street space, we conducted VR experiments to verify the relationship between the object spacing on the street, the gazing direction while walking, and distance perception. In the experiment, street trees were assumed as objects, and their spacing and gazing direction were used as variables to investigate their influence on distance perception. As a result, we confirmed that the distance was estimated to be longer when the distance between trees was narrower, and that there was no significant result on the gazing direction. This result indicates that the design of the street space should be such that the spacing between objects is not narrowed in order to avoid the perception of longer distances. Additionally, it is expected that the induction of walking speed can be effective in promoting health and creating a lively atmosphere because the possibility that tree spacing influences the speed perception is suggested.