

探索可能性の高い空間構成を規定する 空間的な蓋然性に関する評価指標の検討

Study of Evaluation Indicators for Spatial Uncertainty that determine Spatial Compositions with Potential for Exploration.

根本悠樹^{1,2} 井上康博¹

Yuki Nemoto^{1,2}, Yasuhiro Inoue¹

¹ 京都大学大学院工学研究科

¹ Graduate School of Engineering, Kyoto University

² 日本学術振興会

² Japan Society for the Promotion of Science

Abstract: 部屋のどこからともなく、音声応答が返ってくるようなスマートホームでは、ユーザーから見てどこにエージェントがいるのかが定まらず、周囲の空間が、エージェントそのもの、ないしはエージェントの存在領域とみなされる可能性がある。部屋の奥に何があるかわからない蓋然性が強調されることで、エージェントがいるかもしれないという空間に対する期待感を生じる。本研究では、このようなエージェントとのインタラクションを実現する上で必要となる、空間への探索行動を促す、空間の蓋然性の評価指標の検討を行う。

1. はじめに

音声応答を行うスマートスピーカーに代表されるように、高度なセンシング技術とともに情報技術が生活環境に偏在化するに従い、アンビエントなメディアとしてのエージェントの在り方が私たちの生活に与える影響は増している。その中で、エージェントの姿かたちを直接的に表現することなく、音などの限られた感覚刺激を提示することで、インタラクションの対象を周囲の環境としたエージェントの在り方の構想、手法の提案がなされてきた[1,2,3]。

ここで、ある空間に対して、そこにエージェントが存在しているというユーザーの想像を持続するにあたり、空間構成が与える影響は無視できない。例えば、家の中でエージェントが音声応答を行う状況において、部屋の隅々まで見渡せる空間構成(図1(i))では音声はスピーカーからの出力として把握される。一方、壁やふすま等によって所々が隠れて見えないような空間構成(図1(ii))では、音声が届く遮蔽物の奥の空間はユーザーから見えていないことから、その空間にエージェントが存在するという蓋然性は完全には否定されず、空間に保持される。『見えがくれする都市』[4]において槇は、日本の都市空間における「奥」という空間概念に言及した。日本人は主観的に見えない空間領域に対して、内部を知り

えない深遠なものとして「奥」を認識し、そこに至る過程を想定する。「奥」が見え隠れする空間構成から、見通し得ない「奥」を夢想し、そこに至るまでの様々な探索を行う、というような空間体験が構築される。以上より、不可視性のある空間構成には、ユーザーがエージェントの存在を想像することを支援するポテンシャルがあると考えられる。

では、周囲の環境を対象とするインタラクションにおいて、その環境の空間構成は何を基準に有効であると判断できるのだろうか。本研究では、見え隠れという空間の可視性に時間変化を生じる空間構成が1つの有効な方策であるという仮定の下、その環境中の不可視領域には何があるのかという人の奥へ

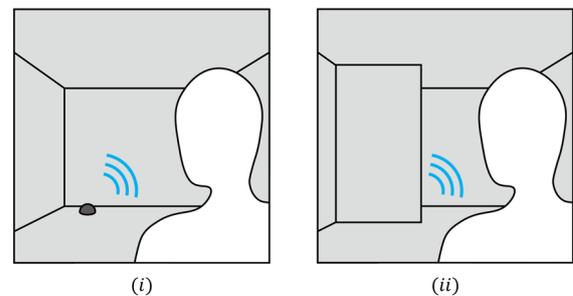


図1. 空間を対象とするインタラクションにおける空間構成の違い

の想像，すなわち空間の蓋然性を，定量的に評価するための手順と指標の検討を行う．本研究では，空間の可視性の分析手法 Isovist[5]と，空間内で行われる探索行動の2つの側面から評価を行う．

2. Isovist

空間内に位置する一人称視点からの空間体験を定量的に分析する手法として，Isovist が建築学において広く用いられている．Isovist は，ある視点位置から周囲の空間を見渡したときの可視領域を記述したものである．Isovist は本来3次元領域であるが，視点高さでの2次元の断面が空間の分析においては使用される．

図2に2次元の Isovist を示す．Isovist は，視点位置 x から見える空間上の点の集合 $V(x)$ として表され，その境界 $\partial V(x)$ は見えた物体表面の境界 $S(x)$ 上の点を結ぶ線により形成される．境界 $\partial V(x)$ 上で物体が存在しない領域は遮蔽境界 $R(x)$ と呼ばれ， $\partial V(x) = S(x) + R(x)$ となる．Isovist の形状から計算される指標を用いることで，空間の知覚が定量的に分析される．物体表面の周長 $P(x) = |S(x)|$ はどれくらいの物体が見えているかを表し，遮蔽境界の周長 $Q(x) = |R(x)|$ は環境内の物体表面が互いに部分的に覆い合う深さの総和であり，これはどれくらい物体が隠れているかを表す．Isovist は，人間の複雑な空間体験を理解するために，屋内空間から中国の庭園まで幅広く適用される[6,7]．

3. 手法

本研究では，遮蔽物として壁が複数枚配置された空間構成における人の探索行動を，2次元のモデル環境上におけるエージェントの行動としてモデル化する．遮蔽の程度の異なる空間構成のモデル環境において行動シミュレーションを行い，その空間構成の遮蔽の度合いを特徴づける Isovist の指標と，エージェントの行動に関する指標との比較により，空間の蓋然性を表現する指標の検討を行う．

3.1. 探索行動モデル

モデル環境は占有格子地図として離散化されており， i 番目の格子空間には，物体が存在するか，しないかの二値状態 $m^i = \{occupied, free\}$ が割り当てられる．探索行動のシミュレーションでは各ステップで，エージェントは次の行動を選択し，選択された行動を取った後にモデル環境の観測と更新を行う．

エージェントの観測 z_t は，視点 x における Isovist による視界 $V(x)$ で表現される． $V(x)$ の領域内に含まれ

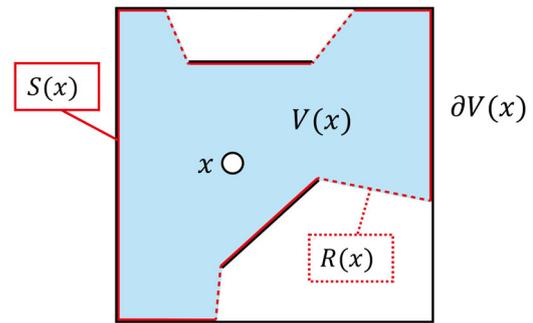


図2. Isovist

る格子空間は観測され，バイナリベイズフィルタにより状態が更新される．

時刻 t におけるエージェントの行動 $u_t = \{-1: backward, 0: stay, +1: forward\}$ は，後退，静止，前進の3種類である．行動の選択は，以下の手順で行われる．

1. 時刻 t の時点で既知の環境の状態に基づき，現在地 x_t から行動 \hat{u}_t を行った場合の位置 $\hat{x}_{t+1} = x_t + \hat{u}_t$ における視界 $V(\hat{x}_{t+1})$ による観測 \hat{z}_{t+1} を行い，環境の状態を更新する．
2. 格子空間の状態 m^i の事前確率 $p(m^i)$ と事後確率 $p(m^i | \hat{z}_{t+1})$ のカルバック・ライブラー情報量 $D_{KL}(p(m^i | \hat{z}_{t+1}) || p(m^i))$ は，観測を行ったことで新たにエージェントが得た格子空間の情報利得を表し，人の注意を惹きつける驚きに対応するとされている[8]．
3. 視界 $V(\hat{x}_{t+1})$ のすべての格子空間の情報利得の総和を取り，行動 \hat{u}_t を取った際に予想される情報利得 $I(\hat{u}_t)$ が計算される．
4. エージェントは，情報利得 $I(\hat{u}_t)$ が最大となる行動を選択する．複数の行動で情報利得に差がない場合には，ランダムに選択がなされる．

行動の選択と観測を繰り返すことで，与えられた空間構成の環境において探索行動を行うエージェントをモデル化する．一定回数以上ランダムな選択が連続して繰り返された場合，探索行動を終了させる．

3.2. 空間の遮蔽度合いに関する指標

モデル環境内の視点位置 x でのエージェントの Isovist による視界 $V(x)$ の遮蔽境界の周長 $Q(x)$ を境界長さ $\partial V(x)$ で $0 \sim 1$ の値に規格化した比について，エージェントが行動可能な範囲のすべての点 x での平均を取ることで，空間の遮蔽度合い $Oclusivity$ を以下の式で定義する．

$$Oclusivity = \frac{Q(x)}{\partial V(x)}$$

3.2. 探索行動に関する指標

モデル環境におけるエージェントの探索行動に関して、行動の広がりや行動の複雑性の2つの指標を導入する。

行動の広がり H_{pos} は、シミュレーション終了時点で、エージェントがモデル環境をどれだけ広範囲に探索して回ったかを表す指標であり、行動範囲内の位置 x にエージェントが存在する確率 $p(x)$ の不確定性により評価を行う。尚、 N は行動可能な範囲のサイズであり、 H_{pos} は0~1の値に規格化される。

$$H_{pos} = \left(- \sum_x p(x) \log(p(x)) \right) / \log(N)$$

行動の複雑性 H_{move} は、取られる行動 u_t のバリエーションを表す指標である。行動 u_t の時系列データから、3種類の行動の内、行動 i の選択される確率 π_i 、行動 i の次に行動 j が選択される遷移確率 p_{ij} をそれぞれ求める。行動の複雑性は、ある行動からどの行動が続くかの不確定性の期待値により評価を行う。 H_{move} は0~1の値に規格化される。

$$H_{move} = \left(- \sum_i \pi_i \sum_j p_{ij} \log p_{ij} \right) / \log(3)$$

4. シミュレーション

4.1. 計算条件

モデル環境を図3に示す。モデル環境は一辺の格子数が300の2次元の正方形領域であり、壁以外に物体は存在しない。各格子の状態に対する信念の初期値は、 $p(m^i = free) = 0.5$ とする。

エージェントは正方形領域の底辺 $y = 0$ の直線上のみを移動し、 $y \geq 0$ の領域を観測しながら移動する。エージェントの初期位置は、以下で説明するように空間構成が左右対称であるため、 $x = 0 \sim 145$ の5刻みの30点とした。

見え隠れという空間の可視性に時間変化を生じる環境を構成するために、本研究では壁を配置し、壁と壁のすきまの幅の変化に応じて、3節に示した指標がどのように変化を見る。エージェントから1辺の4分の1の距離だけ離れた、 $y = 75$ の直線上に厚みのない壁を配置する。壁の配置は領域内で左右対称、壁と壁のすきまは等間隔とする。壁の配置は、壁全体が一辺をどれだけ覆うのかの比率と、壁の分割数により定められる。壁の比率は0.1~0.9まで0.1刻みの9通り、分割数は1~9の9通りで、計81通

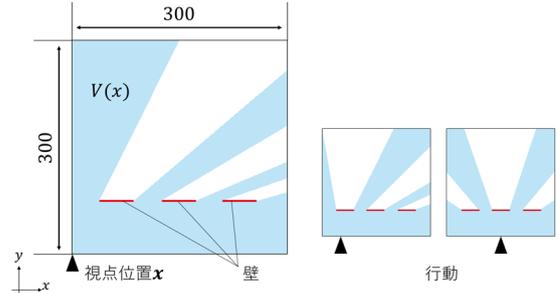


図3. モデル環境 (比率=0.5, 分割数=3の場合)

表1. 各空間構成におけるOcclusivity

		比率								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
分割数	1	0.27019	0.26936	0.26799	0.2651	0.25541	0.23722	0.20947	0.16781	0.10504
	2	0.37282	0.38233	0.39214	0.40283	0.41464	0.42824	0.44196	0.45571	0.4698
	3	0.45135	0.46499	0.47963	0.49528	0.51206	0.53011	0.5497	0.57118	0.59491
	4	0.51499	0.52947	0.54501	0.56166	0.57949	0.59864	0.6193	0.64173	0.66637
	5	0.56642	0.58116	0.59643	0.61307	0.63087	0.64946	0.66993	0.69215	0.71596
	6	0.60783	0.62201	0.63734	0.6536	0.67053	0.68904	0.70892	0.73035	0.75314
	7	0.64143	0.65552	0.67041	0.68618	0.70288	0.72063	0.73954	0.75978	0.78158
	8	0.66994	0.68381	0.69806	0.7131	0.72932	0.74611	0.7643	0.78327	0.80397
	9	0.69438	0.70762	0.72149	0.73605	0.75136	0.76749	0.78453	0.80262	0.82189

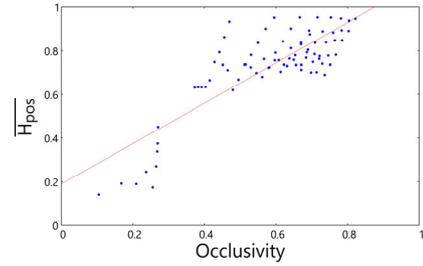


図4. Occlusivityと行動の広がり $\overline{H_{pos}}$ の関係

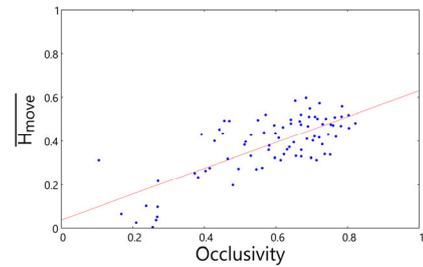


図5. Occlusivityと行動の複雑性 H_{move} の関係

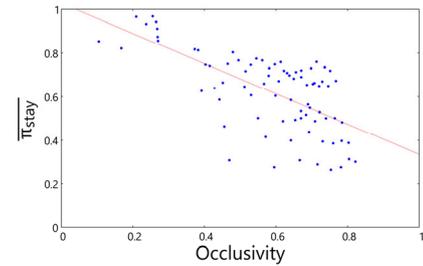


図6. Occlusivityと行動stayの選択確率 $\overline{\pi_{stay}}$ の関係

りの空間構成で計算を行った。

4.2. 結果

表 1 は、各空間構成における空間の遮蔽度合い *Occlusivity* を示す。壁の比率が一定の場合、分割数が多いほどに遮蔽境界長さ $Q(x)$ は増加し *Occlusivity* は高くなる。分割数 >1 では、比率が高いほどに、物体表面の境界線 $S(x)$ が減少し、*Occlusivity* は高くなる。分割数 $=1$ では、比率が高いほどに遮蔽境界長さ $Q(x)$ が大きい値で観測される位置 x が限られるために、*Occlusivity* は低くなる。

図 4, 5 は、*Occlusivity* と行動の広がり、複雑性の関係をそれぞれ示す。行動の広がりとは複雑性は、ある空間構成に対して 30 点の初期値から開始するシミュレーションにより得られた結果の平均値 $\overline{H_{pos}}$, $\overline{H_{move}}$ をそれぞれ示したものである。*Occlusivity* と $\overline{H_{pos}}$ との間には、有意な正の相関が認められた (Pearson の相関係数 $r = 0.829, p < .01$)。また、*Occlusivity* と $\overline{H_{move}}$ の間にも、有意な正の相関が認められた (Pearson の相関係数 $r = 0.738, p < .01$)。

図 6 に *Occlusivity* と行動 *stay* の選択確率の平均 $\overline{\pi_{stay}}$ の関係を示す。両者の間には有意な負の相関が認められた (Pearson の相関係数 $r = -0.658, p < .01$)。

5. 考察

Isovist により計算される *Occlusivity* は壁のすきまの狭まりを抽出した指標であると言える。探索行動に関する指標として本研究で導入した広がり H_{pos} と複雑性 H_{move} は、*Occlusivity* と同様な傾向を示すことが示唆された。このことから、本研究で提案した行動の指標は、見え隠れする空間構成の環境に内在する蓋然性を反映するものであると考えられる。

壁の割合と分割数が増加し、壁と壁のすきまが狭くなるにつれて、すきまから見える可視領域が限られるために、動くことでそれまで不可視であった領域を積極的に探索する行動が引き起こされることが、行動 *stay* の選択確率 π_{stay} が減少することから読み取ることができる。探索行動に着目した指標を用いることで、Isovist を用いた分析を行った場合に定性的に議論される探索行動について、行動のパターンから定量的に分析することが可能となった。

6. 結論

本研究では、空間の蓋然性に関する指標として、その空間における探索行動の広がりとは複雑性という指標を検討し、それらが見え隠れのある空間構成の違いを表現可能なものであることが確認された。

本研究では、いくつかの制約の下に行動シミュレーションの状況を設定した。まず、エージェントの行動範囲に制約を設けたが、制約がなければ壁の奥に移動するなどの行動が生じることが考えられる。次に、エージェントの探索行動の報酬は情報利得の 1 項のみであり、エージェントはわずかな情報利得であってもそれを追い求めて行動し続けるが、飽きや疲労は考慮されていない。最後に、空間構成はすべて対称なものとしたが、非対称な空間構成においては適用されていない。

これらを考慮したモデルを構築することで、より現実の人間の感覚に即した形での空間の蓋然性の指標が得られ、空間を対象とするインタラクションの設計を支援するものとなることが期待される。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP23KJ1309 の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] 前田英作, 南泰浩, 堂坂浩二, 妖精・妖怪の復権 ～新しい「環境知能」像の提案～, 情報処理学会創立 45 周年記念論文, Vol. 47, No. 6, 2006.
- [2] 板垣祐作, 小川浩平, & 小野哲雄. (2008). ITACO on the Room: アンビエントな情報提供を行う生物感のあるエージェントの提案. シンポジウム, (1B-4), 6.
- [3] 高橋英之, 伴碧, 近江奈帆子, 上田隆太, 香川早苗, 石原尚, 中村泰, 吉川雄一郎, & 石黒浩. 五感を用いた心に寄り添う“空気感エージェント”の創成. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) 2019, no. 13 (2019): 1-7.
- [4] 榎文彦, 若月幸敏, 大野秀敏, & 高谷時彦. (1980). 見えがくれする都市. *SD 選書*, 鹿島出版会
- [5] Benedikt, M. L. (1979). To take hold of space: isovists and isovist fields. *Environment and Planning B: Planning and design*, 6(1), 47-65.
- [6] Feld, S., Sedlmeier, A., Friedrich, M., Franz, J., & Belzner, L. (2019, November). Bayesian Surprise in Indoor Environments. In *Proceedings of the 27th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems* (pp. 129-138).
- [7] Chen, H., Li, Y., & Yang, L. (2024). Creating an endless visual space: An Isovist analysis of a small traditional Chinese garden. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 23998083241298739.
- [8] Itti, L., & Baldi, P. (2009). Bayesian surprise attracts human attention. *Vision research*, 49(10), 1295-1306.