

人同士の遮蔽による動的オクルージョンの定式化

崎 貴幸^{1,a)} 廣森 聡仁^{1,b)} 山口 弘純^{1,c)} 東野 輝夫^{1,d)}

概要: 人を計測可能なセンサを広範囲に複数配置するとともに、これらをネットワークで接続することにより、人の位置を把握する行動センシングが広まりつつある。このような行動センシングシステムにおいては、計測対象である人とセンサとの間に遮蔽物がある場合には、センサから人を直接観測できないため、計測範囲内の人の位置を継続的に把握することは容易なことではない。壁や柱などの遮蔽物により人が計測できない静的なオクルージョンだけでなく、計測対象である人が別の人に対して遮蔽物となる動的なオクルージョンも想定され、これらは、センサの配置だけでなく、人の移動速度、人とセンサの位置関係など、人のモビリティに起因するものと考えられる。本研究では、動的なオクルージョンにより計測できない人を定量的に把握するため、計測領域内のセンサと人のモビリティにより生じるオクルージョンを数理的に定式化し、人のモビリティに応じて、動的なオクルージョンがどのように生じるかを調査した。シミュレーションによる評価実験の結果、モビリティの違いにより、動的オクルージョンによる隠蔽時間と隠蔽区間の変化に特徴が生じることを確認した。

1. はじめに

人を計測可能なセンサを広範囲に複数配置するとともに、これらをネットワークで接続することにより、人の位置を把握する行動センシングが広まりつつある。このような行動センシングシステムによって収集された人の位置情報を活用したサービスも検討されており、イベント会場や都心部における混雑緩和、災害時における人々の避難誘導など、人の位置情報に基づくサービス向上が様々な用途において期待されている。例えば、2014年に開催された日立イノベーションフォーラムにおいては、人の動き方を考慮した空間レイアウトの最適化を実現するために、会場に配置された多数のセンサにより来場者の人流情報を計測する取組が実施されている [1]。この取組では、赤外線センサにより、リアルタイムに来場者の動線を把握し、前年の同イベントにおける来場者の移動経路や各展示ブースへの入場状況と比較し、展示ブース配置の変更やサイネージの設置を行った結果、展示ブースの集客率が2%上昇、人数にして850人増加する実績をあげている。また、施設内における人の移動軌跡は、滞在時間が長い店舗や人が多く訪れる店舗を把握するなど、商業的にも有用性の高い情報であ

り、個人レベルの詳細な行動センシングが求められている。

このような行動センシングシステムにおいては、カメラだけでなく、対象物までの位置を正確に計測可能なレーザーレンジスキャナ (LRS) など、高性能なセンサを利用する例も挙げられるが、計測範囲内の人の位置を継続的に把握することは容易なことではない。計測対象である人とセンサとの間に遮蔽物がある場合には、センサから人を直接観測できないため、人の位置を把握したい領域において、いずれかのセンサが人を計測できるよう、複数のセンサにより計測される領域が最大となるようなセンサ配置を導出する研究がいくつか為されている [2-4]。一方で、このような壁や柱などの遮蔽物により人が計測できない静的なオクルージョンだけでなく、計測対象である人が別の人に対して遮蔽物となる動的なオクルージョンも想定され、これらは、センサの配置だけでなく、人の移動速度、人とセンサの位置関係など、人のモビリティに起因するものと考えられる。

本研究では、動的なオクルージョンにより計測できない人を定量的に把握するため、計測領域内のセンサと人のモビリティにより生じるオクルージョンを数理的に定式化し、人のモビリティに応じて、動的なオクルージョンがどのように生じるかを調査した。まず、計測領域内に遮蔽物となる人と計測対象となる人が1人ずついる場合の、様々な移動パターンに対して、動的オクルージョンによって人が計測できなくなる隠蔽区間と隠蔽時間を導出し、その後、遮蔽物となる人が複数人の場合に拡張し、最後にセンサが

¹ 大阪大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

a) t-saki@ist.osaka-u.ac.jp

b) hiromori@ist.osaka-u.ac.jp

c) h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp

d) higashino@ist.osaka-u.ac.jp

複数ある場合について、その隠蔽区間を導出する。シミュレーションによる評価実験の結果、モビリティの違いにより、動的オクルージョンによる隠蔽時間と隠蔽区間の変化に特徴が生じることを確認した。

2. 関連研究

継続的に歩行者を計測する手法として、複数のセンサから常に歩行者を計測できるよう、センサを配置する手法が多数検討されている [2-11]。センサ配置の最適化の問題として、Art Gallery Problem (AGP) [2,5] がよく知られている。AGP では、部屋の形などの幾何学情報が完全に既知の場合に、最小数の警備員で美術館内の全ての地点を監視できる配置を導出する。警備員は無限深度で全方位の視野を有すると仮定しており、無限深度無指向性カメラと捉えることができるため、AGP は幾何学情報が完全に既知の場合の無限深度無指向性カメラの最適な配置を導出する問題と等価である。

計測領域の最大化ではなく、計測領域内の個人を断続的に計測し続ける、トラッキングを目的としてセンサ配置を最適化するための取り組みも行われている [6,7]。単純な計測領域の最大化を目的とした場合は、ある地点にある計測対象を、少なくとも一つのセンサから計測できればその地点を計測領域に含むとしており、「ある地点が少なくとも一つのセンサから計測可能である」という制約条件を満たす領域を最大化するよう、センサ配置を最適化する問題として定式化されている。一方、トラッキングの場合は、一つのセンサから計測対象を計測するだけでは、断続的な計測が可能であるとは限らないので、より強い制約条件が必要になるが、その制約条件は利用するセンサの種類や性能に大きく依存する。文献 [6] においては、センサとしてカメラを使用した場合におけるトラッキングのための制約条件として、「ある地点が少なくとも二つのセンサから計測可能である」と定めている。これは2つ以上のセンサから計測対象を計測できた際に、三角測量により別のセンサからその観測対象の位置が特定可能で、センサ間で計測対象の位置を共有できるため、計測対象が個々のセンサの計測領域をまたがるように移動した際においても、断続的なトラッキングが可能である。さらに、計測対象を識別するために向きを考慮し、「ある地点において、計測対象の特徴をよく表す面を少なくとも二つのセンサから計測可能である」という制約条件のもとで、センサ配置の最適化を行っている。この最適化は、センサの計測領域に対して制約条件を満たす領域の割合が閾値以上になるように、センサ数を最小化する手続きと、その最適化により導出したセンサ数で、制約条件を満たす領域を最大化する手続きから構成される。この手法では断続的なトラッキングに必要な制約条件を定式化してセンサ配置を最適化しているが、動的なオクルージョンは考慮されていない。カメラの場合、柱な

どの高さが十分な静的な遮蔽物は無視できないが、動的な遮蔽物として考えられる人に関しては、高さがあまり高くないため、カメラを十分な高さに設置することでそのオクルージョンを無視できるとしている。

動的オクルージョンは、ある計測対象が別の計測対象に対して遮蔽物となることで発生する。この動的オクルージョンは計測対象の位置に依存するため、動的オクルージョンを扱うセンサ配置の最適化手法の一つにおいては、計測対象の計測可能性を確率的に捉え、その平均の計測可能性を最大化するように最適化を行っている。文献 [8,9] では、センサの計測領域の面積に対してオクルージョン領域の面積の割合が大きいほど、計測対象が計測しにくくなると仮定し、ある確率分布に従ってランダムに出現した遮蔽物により発生する計測不可能なオクルージョン領域の面積以外の面積の割合を、計測対象の平均の計測可能性として定義している。所定のセンサ数を与えた際に、この平均の計測可能性が最大となるように最適化を行うことで、動的オクルージョンを考慮した計測可能性が最大となるようなセンサ配置を導出することができる。この手法では静的オクルージョンだけでなく、ランダムに発生する動的オクルージョンを考慮している点で優れているが、実際には人はランダムに出現するのではなく特定のモビリティに従って移動するため現実的でない。

3. 動的オクルージョンによる隠蔽区間と隠蔽時間の定式化

本章では、人同士により生じる動的オクルージョンにより人が隠蔽される区間と時間を定式化する。以下では、センサから計測される人を計測対象、この計測対象を隠す人を遮蔽物とする。まず、センサが一つで、遮蔽物と計測対象が一つずつある場合について定式化を行い、次に定式化した式を遮蔽物が複数ある場合に拡張し、最後に複数センサに拡張する。これにより、複数センサにおける動的オクルージョンによる隠蔽区間と隠蔽時間がわかれば、オクルージョン発生の前後で計測対象の一致を確認することも可能となると考える。この定式化において、センサは計測時間およびステップ角が無限小である理想センサであると仮定し、計測対象の一部でもセンサから計測できれば、計測可能であると定義する。この定式化では、まず、動的オクルージョンによる隠蔽時間が長くなり、その影響が大きいと考えられる、遮蔽物と計測対象が同方向に移動する場合を対象とする。

3.1 遮蔽物、計測対象のモビリティと動的オクルージョン

以下では原点にセンサが設置されている xz 平面状を、 z 軸正方向に遮蔽物と計測対象が移動する場合を考える。このような仮定においても対称性より一般性を失わない。さらに2つの物体の半径を r 、センサに近い側の遮蔽物の

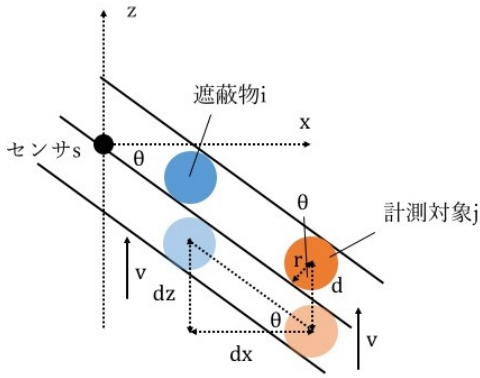


図 1 同速度の場合

座標を (x_i, z_i) , 速度を v_i とし, センサから遠い側の計測対象の座標を (x_j, z_j) , 速度を v_j とする.

3.1.1 遮蔽物と計測対象が同速度で移動するとき

計測対象が遮蔽物によって完全に隠されるのは, センサと計測対象の間に遮蔽物が存在し, センサから計測対象が全く確認できないような位置関係の時である. これは2次元平面上では, センサと計測対象の間に遮蔽物が存在し, センサと計測対象の間に1本も直線が引けない位置関係に相当する. 以下では, このような位置関係が成立する間は, 動的オクルージョンにより計測対象が計測できないため, この間に計測対象が移動する区間を隠蔽区間, 隠蔽区間を計測対象が移動する時間を隠蔽時間として導出する. このような位置関係を求める際に, 遮蔽物と計測対象, 2つの円の共通外接線に着目する. 共通外接線は2つの円に接している接線のうち, 接線を挟んで同じ側に2つの円が存在する2本の直線である. 2本の共通外接線と遮蔽物に囲まれた領域は, 計測対象から1本も直線を引くことができない領域である. よってこの領域内にセンサが存在するような位置関係の時は, 動的オクルージョンにより計測対象が計測できない. ここでは遮蔽物と計測対象がどちらも人であり, 同じ大きさであると仮定しており, 共通外接線は平行となる. よって, 2本の共通外接線と遮蔽物に囲まれた領域の代わりに, 2本の共通外接線の間にセンサが存在する場合に, 計測対象が隠蔽されると簡略化することができるため, 以下ではセンサ, 遮蔽物, 計測対象がこのような位置関係となる区間と時間を導出する. その際, 遮蔽物と計測対象の x 軸方向の差を dx , z 軸方向の差を dz , それぞれの速さを $v_i = v_j = v$ とする.

図1は, 遮蔽物と計測対象が同速度で移動するときの, 動的オクルージョンによる計測対象の隠蔽が始まる直前と終わる直前の, 遮蔽物と計測対象の位置関係を示した図である. 図1の, 青色の円は遮蔽物を, 橙色の円は計測対象を表しており, 図の実線は遮蔽物と計測対象の共通外接線

を表している. 図1中の色の薄いものは, 計測対象が遮蔽物によって完全に隠蔽され始める直前の位置関係を示している. これは遮蔽物と計測対象の z 座標正方向側の共通外接線がセンサを通過するときであり, これ以降はセンサが遮蔽物と計測対象の2本の共通外接線の間に入るため, 動的オクルージョンによる計測対象の隠蔽が発生する直前の位置関係である. 色の濃いものは, 遮蔽物による計測対象の隠蔽が終わる直前の位置関係を示している. これは遮蔽物と計測対象の z 座標負方向側の共通外接線がセンサを通過するときであり, これ以降はセンサが遮蔽物と計測対象の2本の共通外接線の間から外れるため, 動的オクルージョンによる計測対象の隠蔽が終了する直前の位置関係である. よって, 動的オクルージョンにより計測対象が計測できない隠蔽区間は図1の d の区間である.

図1より, センサ s での遮蔽物 i による計測対象 j の動的オクルージョンによる隠蔽時間 $t^{s,i,j}$ と動的オクルージョンが発生する際の共通外接線の方位角 $\theta_1^{s,i,j}$ と動的オクルージョンが終了する際の共通外接線の方位角 $\theta_2^{s,i,j}$ は

$$\theta = \theta_1^{s,i,j} = \theta_2^{s,i,j} \quad (1)$$

$$t^{s,i,j} = \frac{d}{v} \quad (2)$$

を満たし, 以下の幾何学的関係が成り立つ.

$$d = \frac{2r}{\cos \theta} \quad (3)$$

$$\cos \theta = \frac{dx}{\sqrt{dx^2 + dz^2}} \quad (4)$$

$$\tan \theta = \frac{dz}{dx} \quad (5)$$

これらの式より

$$\begin{cases} \theta_1^{s,i,j} = \theta_2^{s,i,j} = \arctan \frac{dz}{dx} & (6a) \\ t^{s,i,j} = \frac{2r\sqrt{dx^2 + dz^2}}{vdx} & (6b) \end{cases}$$

が得られる.

3.1.2 遮蔽物と計測対象が異なる速度で移動するとき

遮蔽物と計測対象が同速度で移動する時と同様に, 計測対象が遮蔽物によって完全に隠されるのは, センサと計測対象の間に遮蔽物が存在し, センサから計測対象が全く確認できないような位置関係の時である. これは2次元平面上では, センサと計測対象の間に遮蔽物が存在し, センサと計測対象の間に1本も直線が引けない位置関係に相当する. よって, 遮蔽物と計測対象が同速度で移動する時と同様に, 2本の共通外接線の間にセンサが存在するような位置関係となる区間と時間を導出する. その際, 遮蔽物と計測対象の x 軸方向の差を dx , それぞれの速さを v_i, v_j , $v_i < v_j$ とする. このとき, 遮蔽物と計測対象の z 座標が同じになる時の z 座標を z' とすると, z' の値によって, 動

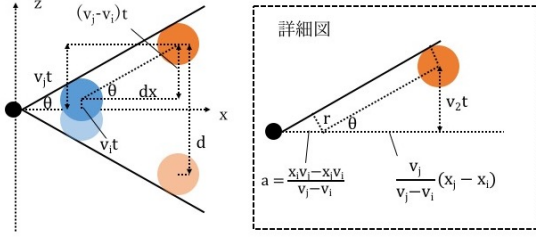


図2 異なる速度, $z' = 0$ のとき

的オクルージョンによる計測対象の隠蔽区間が変化する。 $z' = 0$ では、図2のように $z < 0$ の領域で隠蔽が開始し、 $z > 0$ で終了する。 $z' > 0$ では図3、図4のように $z > 0$ の領域で隠蔽が開始・終了する。 $z' < 0$ では $z < 0$ の領域で隠蔽が開始・終了する。このように z' の値によって隠蔽が発生する領域が異なるため、場合分けして定式化を行う。

• $z' = 0$ のとき

図2は、遮蔽物と計測対象が異なる速度で移動するときで、かつ $z' = 0$ となるときの、動的オクルージョンによる計測対象の隠蔽が始まる直前と終わる直前の、遮蔽物と計測対象の位置関係を示した図である。図2中の色の薄いものは、計測対象が遮蔽物によって完全に隠蔽され始める直前の位置関係を示している。これは遮蔽物と計測対象の z 座標負方向側の共通外接線がセンサを通過するときであり、これ以降はセンサが遮蔽物と計測対象の2本の共通外接線の間に入るため、動的オクルージョンによる計測対象の隠蔽が発生する直前の位置関係である。色の濃いものは、遮蔽物による計測対象の隠蔽が終わる直前の位置関係を示している。これは遮蔽物と計測対象の z 座標正方向側の共通外接線がセンサを通過するときであり、これ以降はセンサが遮蔽物と計測対象の2本の共通外接線の間から外れるため、動的オクルージョンによる計測対象の隠蔽が終了する直前の位置関係である。よって、動的オクルージョンにより計測対象が計測できない隠蔽区間は図2の d の区間である。

図2より、センサ s での遮蔽物 i による計測対象 j の動的オクルージョンによる計測対象の隠蔽が始まった時から $z_i = z_j = z'$ となるまでの時間 $t_1^{s,i,j}$ と、 $z_i = z_j = z'$ となった時から動的オクルージョンによる計測対象の隠蔽が終わるまでの時間 $t_2^{s,i,j}$ 、および動的オクルージョンが開始する際の共通外接線の方位角 $\theta_1^{s,i,j}$ と、動的オクルージョンが終了する際の共通外接線の方位角 $\theta_2^{s,i,j}$ は

$$t = t_1^{s,i,j} = t_2^{s,i,j} \quad (7)$$

$$\theta = \theta_1^{s,i,j} = \theta_2^{s,i,j} \quad (8)$$

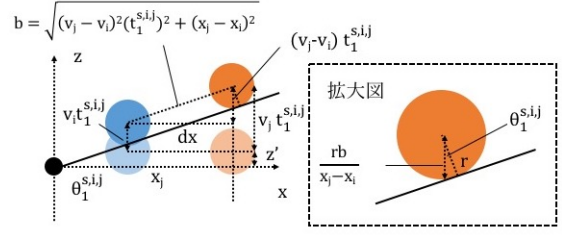


図3 $z' > 0$ のときのオクルージョン開始位置

を満たし、 θ と t は次の連立方程式を解くことで得られる。

$$\begin{cases} \tan \theta = \frac{v_j - v_i}{x_j - x_i} t & (9a) \\ \tan \theta = \frac{r}{\sqrt{a^2 - r^2}} & (9b) \end{cases}$$

ただし、 a は次式で表すものとする。

$$a = \frac{x_i v_j - x_j v_i}{v_j - v_i} \quad (10)$$

ここで $(v_j - v_i)t$ は $z_i = z_j = z'$ となってから動的オクルージョンが終了するまでに遮蔽物と計測対象が進む距離の差を表す。この連立方程式を解くと、

$$\begin{cases} \theta_1^{s,i,j} = \theta_2^{s,i,j} = \arctan \frac{r}{\sqrt{a^2 - r^2}} & (11a) \\ t_1^{s,i,j} = t_2^{s,i,j} = \frac{x_j - x_i}{v_j - v_i} \frac{r}{\sqrt{a^2 - r^2}} & (11b) \end{cases}$$

が得られる。

• $z' > 0$ のとき

図3は、遮蔽物と計測対象が異なる速度で移動するときで、かつ $z' > 0$ となるときの、動的オクルージョンによる計測対象の隠蔽が始まる直前の、遮蔽物と計測対象の位置関係を示した図である。図3中の薄いものは、遮蔽物と計測対象の z 座標が同じになるとき、つまり $z_i = z_j = z'$ となるときの位置関係である。色の濃いものは、計測対象が遮蔽物によって完全に隠蔽され始める直前の位置関係を示している。これは遮蔽物と計測対象の z 座標負方向側の共通外接線がセンサを通過するときであり、これ以降はセンサが遮蔽物と計測対象の2本の共通外接線の間に入るため、動的オクルージョンによる計測対象の隠蔽が発生する直前の位置関係である。

このとき、動的オクルージョンが開始する際の共通外接線の方位角 $\theta_1^{s,i,j}$ と、 $z_i = z_j = z'$ となった位置から動的オクルージョンによる隠蔽開始までの時間 $t_1^{s,i,j}$ は次の連立方程式を解くことで得られる。図3より、

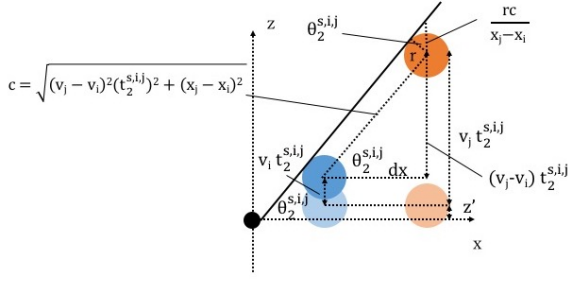


図 4 $z' > 0$ のときのオクルージョン終了位置

$$\begin{cases} \tan \theta_1^{s,i,j} = \frac{v_j - v_i}{x_j - x_i} t_1^{s,i,j} & (12a) \\ \tan \theta_1^{s,i,j} = \frac{-\frac{rc}{x_j - x_i} + v_j t_1^{s,i,j} + z'}{x_j} & (12b) \end{cases}$$

ただし、 b は次式で表すものとする。

$$b = \sqrt{(v_j - v_i)^2 (t_1^{s,i,j})^2 + (x_j - x_i)^2} \quad (13)$$

ここで $(v_j - v_i)t_1^{s,i,j}$ は $z_i = z_j = z'$ となってから動的オクルージョンによる計測対象の隠蔽が開始するまでに遮蔽物と計測対象が進む距離の差を表す。また、この連立方程式を解いた結果は非常に煩雑であるため省略する。

また、図 4 は、遮蔽物と計測対象が異なる速度で移動するときで、かつ $z' > 0$ となるときの、動的オクルージョンによる計測対象の隠蔽が始まる直前の、遮蔽物と計測対象の位置関係を示した図である。図 4 中の薄いものは、遮蔽物と計測対象の z 座標が同じになるとき、つまり $z_i = z_j = z'$ となるときの位置関係である。色の濃いものは、遮蔽物による計測対象の隠蔽が終わる直前の位置関係を示している。これは遮蔽物と計測対象の z 座標正方向側の共通外接線がセンサを通過するときであり、これ以降はセンサが遮蔽物と計測対象の 2 本の共通外接線の間から外れるため、動的オクルージョンによる計測対象の隠蔽が終了する直前の位置関係である。

$\theta_1^{s,i,j}$, $t_1^{s,i,j}$ と同様に、動的オクルージョンが終了する際の共通外接線の方位角 $\theta_2^{s,i,j}$ と、 $z_1 = z_2$ となった位置から動的オクルージョンによる隠蔽終了までの時間 $t_2^{s,i,j}$ は次の連立方程式を解くことで得られる。図 4 より、

$$\begin{cases} \tan \theta_2^{s,i,j} = \frac{v_j - v_i}{x_j - x_i} t_2^{s,i,j} & (14a) \\ \tan \theta_2^{s,i,j} = \frac{\frac{rc}{x_j - x_i} + v_j t_2^{s,i,j} + z'}{x_j} & (14b) \end{cases}$$

ただし、 c は次式で表すものとする。

$$c = \sqrt{(v_j - v_i)^2 (t_2^{s,i,j})^2 + (x_j - x_i)^2} \quad (15)$$

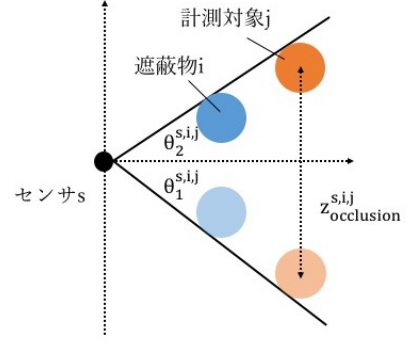


図 5 センサ s に対する遮蔽物 i による隠蔽区間

ここで $(v_j - v_i)t_2^{s,i,j}$ は $z_i = z_j = z'$ となってから動的オクルージョンによる隠蔽が終了するまでに遮蔽物と計測対象が進む距離の差を表す。また、この連立方程式を解いた結果は非常に煩雑なため省略する。こうして計算した $t_1^{s,i,j}$, $t_2^{s,i,j}$ より、隠蔽時間 t は $t = t_2^{s,i,j} - t_1^{s,i,j}$ で求めることができる。

• $z' < 0$ のとき

$z' > 0$ のときと同様に、動的オクルージョンが開始する際の共通外接線の方位角 $\theta_1^{s,i,j}$ と $z_i = z_j = z'$ となった位置から動的オクルージョンによる隠蔽開始までの時間 $t_1^{s,i,j}$ 、動的オクルージョンが終了する際の共通外接線の方位角 $\theta_2^{s,i,j}$ と $z_i = z_j = z'$ となった位置から動的オクルージョンによる隠蔽終了までの時間 $t_2^{s,i,j}$ を求めることができる。

3.2 複数物体の位置関係とオクルージョン

section 3.1 の関係を複数物体の場合に拡張する。図 5 のようにセンサ s の、遮蔽物 i によって発生する観測対象 j の動的オクルージョンが開始する際の方位角を $\theta_{1_occlusion}^{s,i,j}$ 、位置の z 座標を $z_{1_occlusion}^{s,i,j}$ 、オクルージョンが終了する際の方位角を $\theta_{2_occlusion}^{s,i,j}$ 、位置の z 座標を $z_{2_occlusion}^{s,i,j}$ とすると、 $z_{1_occlusion}^{s,i,j}$ 、 $z_{2_occlusion}^{s,i,j}$ は次式で表される。

$$z_{1_occlusion}^{s,i,j} = x \tan \theta_{1_occlusion}^{s,i,j} + \frac{r}{\cos \theta_{1_occlusion}^{s,i,j}} \quad (16)$$

$$z_{2_occlusion}^{s,i,j} = x \tan \theta_{2_occlusion}^{s,i,j} - \frac{r}{\cos \theta_{2_occlusion}^{s,i,j}} \quad (17)$$

$z_{1_occlusion}^{s,i,j} < z_{occlusion}^{s,i,j} < z_{2_occlusion}^{s,i,j}$ となる $z = z_{occlusion}^{s,i,j}$ の範囲では遮蔽物 i のオクルージョンによって計測対象 j が計測できなくなる。

複数物体による計測対象 j の隠蔽区間 $z_{occlusion}^{s,j}$ は次式で表される。

$$z_{occlusion}^{s,j} = \bigcup_i z_{occlusion}^{s,i,j} \quad (18)$$

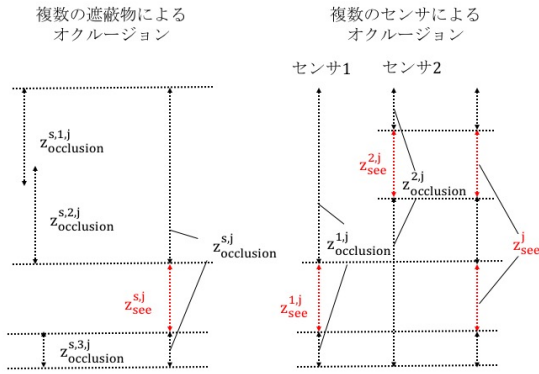


図 6 複数遮蔽物に対する隠蔽区間 (左)
複数センサに対する隠蔽区間 (右)

また、隠蔽区間でなく、計測可能な範囲 $z_{see}^{s,j}$ は次式で表される。

$$z_{see}^{s,j} = \{z | z \notin z_{occlusion}^{s,j}\} \quad (19)$$

これを複数センサの場合に拡張する。どれか1つのセンサから計測対象 j が見えていれば、計測可能とすると、計測可能な範囲 z_{see}^j は次式で表される。

$$z_{see}^j = \bigcup_s z_{see}^{s,j} \quad (20)$$

以上で動的オクルージョンが発生しても、計測対象を計測可能な領域を導出することができる。

4. 歩行パターンと隠蔽時間に関する考察

本章では、シミュレーションによりセンサデータを収集し、様々な歩行パターンと動的オクルージョンによる隠蔽時間の関係について考察する。

4.1 シミュレーション環境

ゲーム開発エンジン Unity 上にシミュレータを作成し、シミュレーションによってセンサデータを取得することでデータの取得を行った。センサは、LRS を用いた屋内歩行者の位置と軌跡のトラッキングシステムである「ひとなび」[12] で使用されている、「UTM-30LX」を想定している。「UTM-30LX」は走査範囲が 30m、視野角が 270 度、ステップ角 0.25 度、スキャン時間 25ms の高性能センサである。このセンサを Unity 上で実装しシミュレーションを行ったが、Unity の制約上、スキャン時間は 100ms としている。また、人の半径は、平均の肩幅である 20cm、歩行速度は 25cm/s~100cm/s とした。

4.2 歩行パターンと隠蔽時間

歩行パターンによって動的オクルージョンによる隠蔽時間がどのように変化するかを、シミュレーションによる

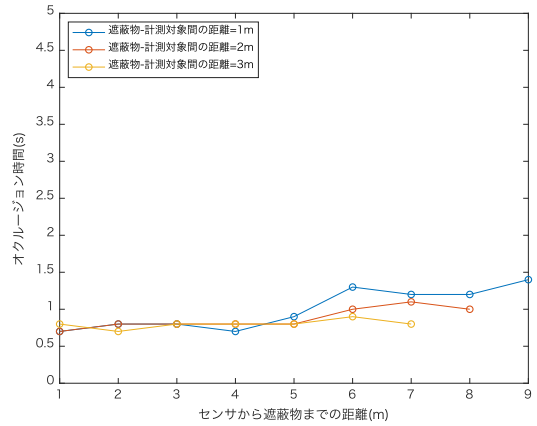


図 7 遮蔽物-計測対象間の距離を固定した時の隠蔽時間の比較

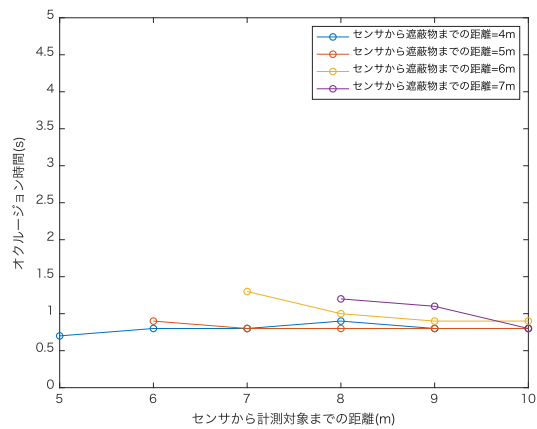


図 8 遮蔽物を固定した時の隠蔽時間の比較

データから考察した。

4.2.1 同速度で、遮蔽物-計測対象間の z 座標のずれがない場合

($v_i = v_j = v, dz = 0$ の場合)

遮蔽物と計測対象が同速度で、 z 座標が常に同じである場合の隠蔽時間の関係について記述する。

- 遮蔽物と計測対象の位置関係による隠蔽時間の比較
図 11~図 9 は、 $dz = 0$ の時に遮蔽物と計測対象の位置関係を変化させながらシミュレーションを行い、動的オクルージョンによる隠蔽時間を調べた結果である。図 11 は遮蔽物-計測対象間の距離を一定に保ったまま、センサからの距離を変えながらシミュレーションを行った結果、図 8 はセンサ-遮蔽物間の距離を一定に保ち、センサ-計測対象間の距離を変えながらシミュレーションを行った結果、図 9 はセンサ-計測対象間の距離を一定に保ち、センサ-遮蔽物間の距離を変えながらシミュレーションを行った結果、この結果より、遮蔽物と計測対象の位置関係と隠蔽時間の関係に関し

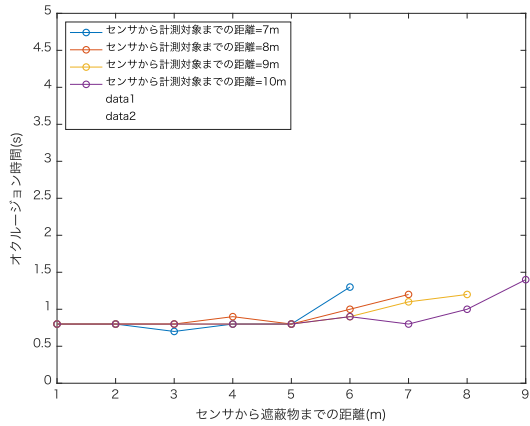


図 9 計測対象を固定した時の隠蔽時間の比較

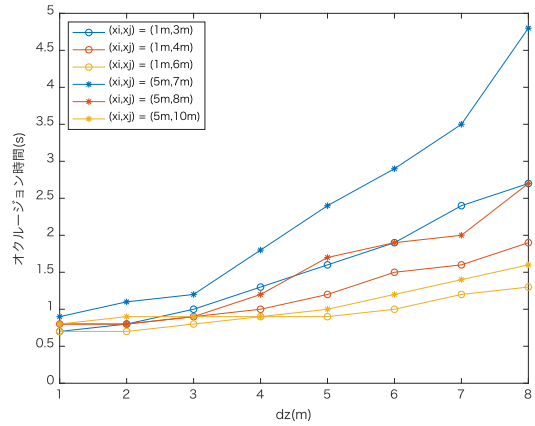


図 11 遮蔽物と計測対象の位置関係による隠蔽時間の比較

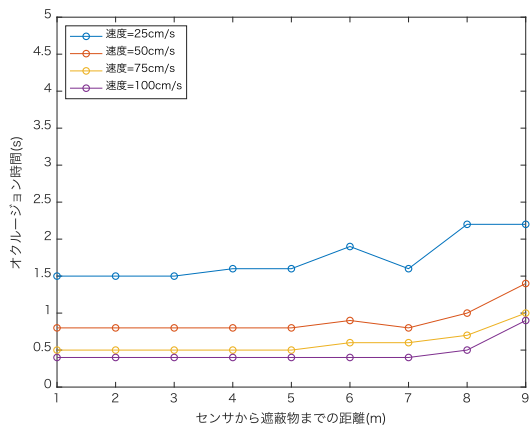


図 10 速度別の隠蔽時間の比較
(計測対象からセンサまでの距離は 10m に固定)

て、以下の 3 つの特徴があることがわかった。

- 遮蔽物-計測対象間の距離が一定の時 (図 11), 遮蔽物と計測対象がセンサから離れるほど隠蔽時間は長くなる。これは遮蔽物と計測対象がセンサに近いほど計測対象がオクルージョン領域に入りやすく、出にくいいため、隠蔽時間は長くなるからである。
- センサ-遮蔽物間の距離が固定の時 (図 8), 計測対象がセンサから離れるほど隠蔽時間は長くなる。これはセンサ-遮蔽物間の距離が近いほど計測対象がオクルージョン領域に入りやすく、出にくいいため、隠蔽時間が長くなるからである。
- センサ-計測対象間の距離が固定の時 (図 9), 遮蔽物がセンサから離れるほど隠蔽時間は長くなる。これは遮蔽物の位置が固定のときと同様に、遮蔽物-計測対象間の距離が近いほど計測対象がオクルージョン領域に入りやすく、出にくいいため、隠蔽時間が長くなるからである。
- 遮蔽物と計測対象の速度による隠蔽時間の比較

図??は、 $dz = 0$ の時に遮蔽物と計測対象の速度を変化させながらシミュレーションを行い、動的オクルージョンによる隠蔽時間を調べた結果である。図??の結果より、速度が大きいほど隠蔽時間が短い事がわかる。これは遮蔽物と計測対象の位置関係が同じ時は、速度に関わらず動的オクルージョンによる隠蔽区間が同じになるため、速度が大きいほどその隠蔽区間を通過する時間が短くなるためである。

4.2.2 同速度で、遮蔽物-計測対象間の z 座標のずれがある場合

($v_i = v_j = v, dz > 0$ の場合)

- 遮蔽物と計測対象の位置関係による隠蔽時間の比較
図 10 は、 $dz > 0$ の時に遮蔽物と計測対象の位置関係を変化させながらシミュレーションを行い、動的オクルージョンによる隠蔽時間を調べた結果である。図 10 の同じ色のグラフは遮蔽物-計測対象間の距離が同じ場合のグラフ、同じマークのグラフはセンサ-遮蔽物間の距離が同じ場合のグラフである。図 10 の結果より、 dz が大きいほど隠蔽時間が長いことがわかる。これは図 1 に示されるように、 dz が大きいほど遮蔽物と計測対象がセンサに対して一直線に並ぶ時の角度 θ が大きくなるため、隠蔽区間 d が大きくなるためである。また、 $dz=0$ の時と同様の特徴も見られた。

4.2.3 異なる速度の場合 ($v_i \neq v_j$ の場合)

遮蔽物と計測対象が異なる速度で移動する場合の動的オクルージョンによる隠蔽時間の特徴について記述する。この場合は遮蔽物と計測対象の z 座標が同じになる z 座標、 z' の値が 0 に近づくにつれて、隠蔽時間が長くなるといった特徴が現れることがわかった。

- 遮蔽物と計測対象の位置関係による隠蔽時間の比較
図 12 は $v_i = 50\text{cm/s}$, $v_j = 100\text{cm/s}$, $\frac{x_j}{x_i} < \frac{v_j}{v_i}$ の時

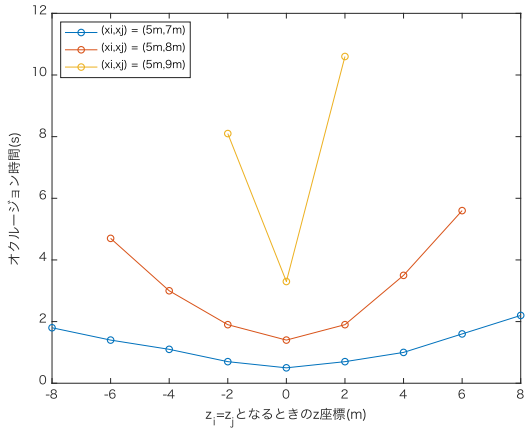


図 12 $v_i = 50\text{cm/s}$, $v_j = 100\text{cm/s}$, $\frac{x_j}{x_i} < \frac{v_j}{v_i}$ の場合の遮蔽物を固定した時の隠蔽時間の比較

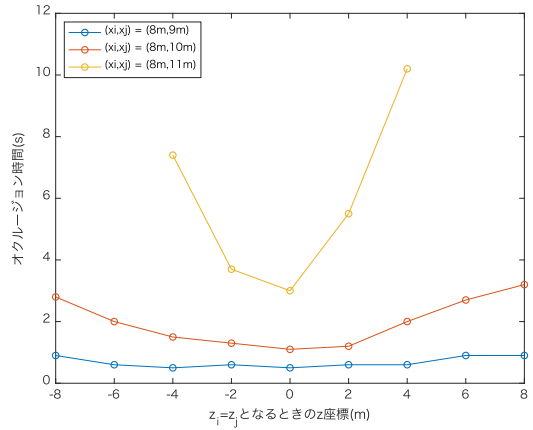


図 14 $v_i = 50\text{cm/s}$, $v_j = 75\text{cm/s}$, $\frac{x_j}{x_i} < \frac{v_j}{v_i}$ の場合の遮蔽物を固定した時の隠蔽時間の比較

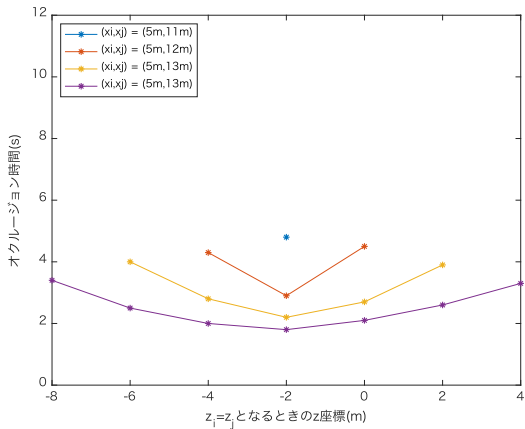


図 13 $v_i = 50\text{cm/s}$, $v_j = 100\text{cm/s}$, $\frac{x_j}{x_i} > \frac{v_j}{v_i}$ の場合の遮蔽物を固定した時の隠蔽時間の比較

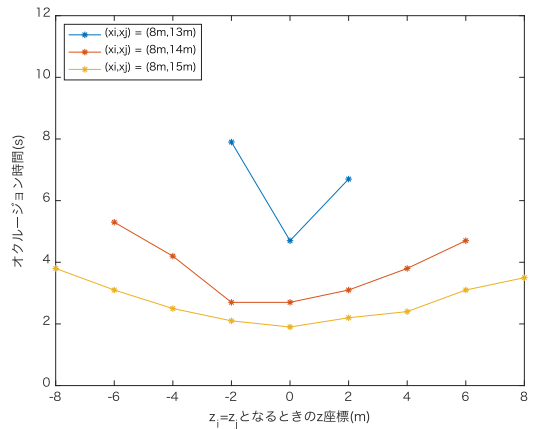


図 15 $v_i = 50\text{cm/s}$, $v_j = 75\text{cm/s}$, $\frac{x_j}{x_i} > \frac{v_j}{v_i}$ の場合の遮蔽物を固定した時の隠蔽時間の比較

に、図 13 は $v_i = 50\text{cm/s}$, $v_j = 100\text{cm/s}$, $\frac{x_j}{x_i} > \frac{v_j}{v_i}$ の時に遮蔽物と計測対象の位置関係を変化させながらシミュレーションを行い、隠蔽時間を調べた結果である。この結果より、以下の2つの特徴があることがわかった。

- センサ-遮蔽物間の距離：センサ-計測対象の距離 = $v_i : v_j$ となる時 ($\frac{x_j}{x_i} = \frac{v_j}{v_i}$ となる時) を境に隠蔽時間の特徴が変化することがわかった。図 12 より、 $\frac{x_j}{x_i} < \frac{v_j}{v_i}$ となるときは、 $\frac{x_j}{x_i}$ が小さくなるほど隠蔽時間は短くなる。
- z' が 0 から離れるほど、隠蔽時間が短くなる。これは z' が 0 から離れるほど遮蔽物と計測対象がセンサに対して一直線に並ぶ際の角度が大きくなるため、結果的に隠蔽区間が大きくなるためだと考えられる。

これらの特徴に加えて、センサ-遮蔽物間の距離：センサ-計測対象の距離 = $v_i : v_j$ となる時 ($\frac{x_j}{x_i} = \frac{v_j}{v_i}$ となる時) の隠蔽時間は、 $z' = 0$ で無限大 (ずっと隠れた

まま) となり、それ以外の $z' \neq 0$ では 0 秒となるということがわかった。また、これらの特徴は速度の比を変えても同様に現れる。

5. 歩行パターンと隠蔽区間に関する考察

本章では、シミュレーションによりセンサデータを収集し、歩行パターンと動的オクルージョンによる隠蔽区間の関係について考察する。シミュレーションは4章と同様の環境で行った。

5.1 歩行パターンと隠蔽区間

歩行パターンによって動的オクルージョンによる隠蔽区間がどのように変化するかを、シミュレーションによるデータから考察した。シミュレーションは、一方通行の通路を想定して一方向に進む歩行者のみの隠蔽区間、および右側通行の通路を想定して両方向に進む歩行者の隠蔽区間の2パターンについて行い、ともに動的オクルージョンが発生しやすい、混雑した状況を想定している。

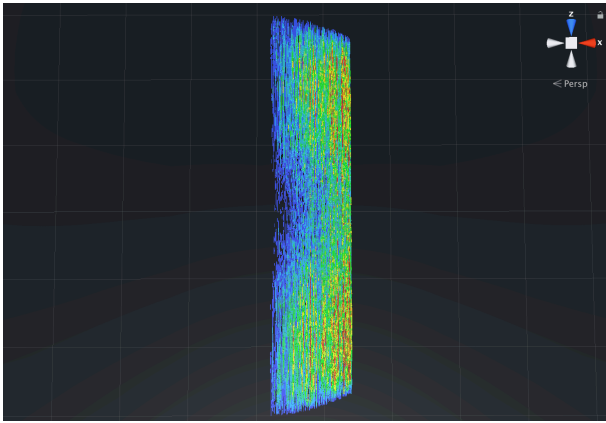


図 16 一方向に進む歩行者の隠蔽区間のヒートマップ

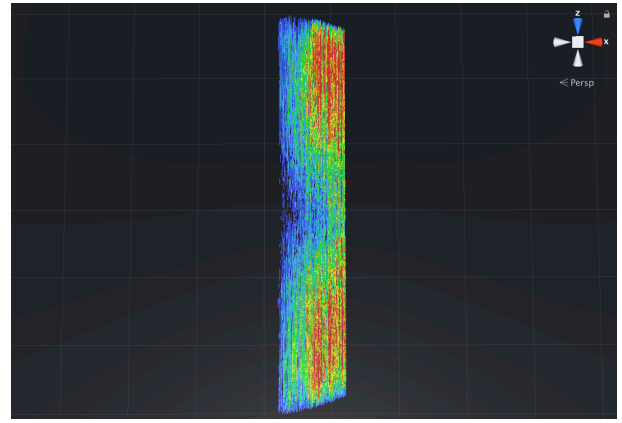


図 18 両方向に進む歩行者の隠蔽区間のヒートマップ

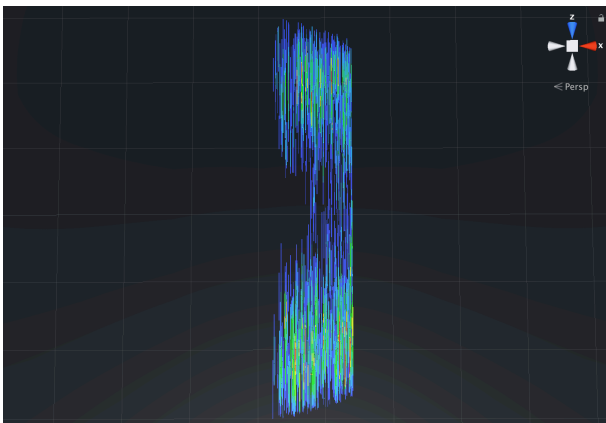


図 17 一方向に進む歩行者の、5m 以上連続して隠蔽される区間のみのヒートマップ

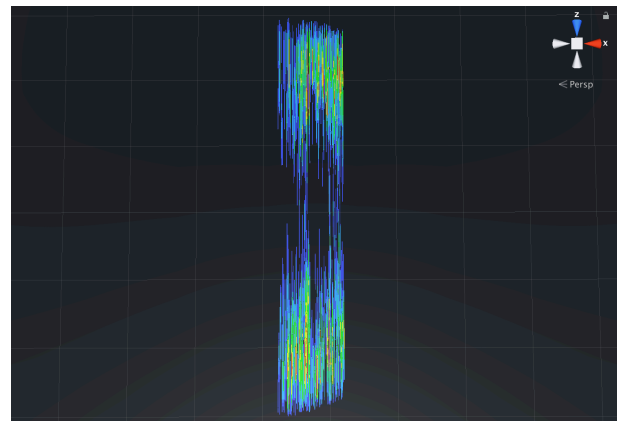


図 19 両方向に進む歩行者の、5m 以上連続して隠蔽される区間のみのヒートマップ

5.1.1 一方向に進む歩行者の隠蔽区間

図 16 は、一方通行の通路を想定し、センサから 2m～14m 離れた場所を、速度 25cm/s～75cm/s で一方向に移動する歩行者を、2000 人生成した場合の動的オクルージョンによる隠蔽区間を、 x, z 座標がともに整数値の座標ごとにヒストグラムとして記録し、それをヒートマップにして表したものである。青色の区間は隠蔽された人数が 1～2 人と少ない区間、赤色の区間は隠蔽された人数が 12 人以上と多い区間である。図 16 より、一方向に進む歩行者の隠蔽区間に関しては、センサから x 座標、 z 座標が離れるほど動的オクルージョンが発生しやすいことがわかる。また、2000 人の歩行者が他の歩行者に隠蔽された座標の数の累計は 317801 であった。さらに、図 17 より、5m 以上連続して隠蔽される区間に関しては、センサまでの x 座標の影響は小さく、 z 座標が離れるほど長期的な隠蔽が起りやすい事がわかる。

5.1.2 両方向に進む歩行者の隠蔽区間

図 18 は、右側通行の通路を想定し、センサから 2m～7m 離れた場所を、速度 25cm/s～75cm/s で一方向に移動する歩行者と、センサから 7m～14m 離れた場所を、速度

25cm/s～75cm/s で反対方向に移動する歩行者を、それぞれ 1000 人生成した場合の動的オクルージョンによる隠蔽区間を、 x, z 座標がともに整数値の座標ごとにヒストグラムとして記録し、それをヒートマップにして表したものである。青色の区間は隠蔽された人数が 1～2 人と少ない区間、赤色の区間は隠蔽された人数が 12 人以上と多い区間である。図 18 より、両方向に進む歩行者の隠蔽区間に関しては、一方向の時と同様に、センサから x 座標、 z 座標が離れるほど動的オクルージョンが発生しやすいことがわかる。また、2000 人の歩行者が他の歩行者に隠蔽された座標の数の累計は 357036 であり、一方向の時と比べて大きく、より動的オクルージョンによる隠蔽が発生しやすい事がわかった。図 19 より、5m 以上連続して隠蔽される区間に関しては、一方向の時と同様にセンサまでの x 座標の影響は小さく、 z 座標が離れるほど長期的な隠蔽が起りやすい事がわかる。

6. おわりに

本研究では、人の位置を把握する行動センシングシステムにおいて、計測対象である人が別の人に対して遮蔽物となる動的なオクルージョンがどのように発生するのか、その動的オクルージョンによる隠蔽区間と隠蔽時間について

数理的に定式化を行った。また、この動的オクルージョンによる隠蔽時間が人のモビリティによってどのように変化するのかについて、シミュレーションによる調査を行った。シミュレーションの結果、遮蔽物と計測対象が同速度の時は、動的オクルージョンによる隠蔽時間が長くなる条件が、遮蔽物と計測対象がセンサから離れていること、遮蔽物-計測対象間の距離が離れていること、速度が小さいこと、であることがわかった。また、遮蔽物と計測対象の速度が異なる時は、動的オクルージョンによる隠蔽時間が長くなる条件が、計測対象が遮蔽物に追いつく位置がセンサから離れていること、遮蔽物と計測対象の速度の比と、遮蔽物と計測対象のセンサからの距離の比が離れていること、であることがわかった。

今後は、人のモビリティごとに、動的オクルージョンによる隠蔽区間がどのような特徴を持つのかについて、より詳細な調査を行いたいと考えている。そして行動センシングシステムにおいて、動的オクルージョン発生条件下でも、計測対象となる人を断続的に計測可能な手法の開発を行いたい。

参考文献

- [1] 日経 BigData: 展示会来場者を赤外線センサーで計測、人の動きの不思議な法則を見いだす (2014). <http://business.nikkeibp.co.jp/article/bigdata/20141106/273529/?P=2>(参照: 2018-08-07).
- [2] Bottino, A. and Laurentini, A.: A nearly optimal algorithm for covering the interior of an art gallery, *Pattern recognition*, Vol. 44, No. 5, pp. 1048–1056 (2011).
- [3] Chrysostomou, D., Sirakoulis, G. C. and Gasteratos, A.: A bio-inspired multi-camera topology for crowd analysis, *1st International Workshop on Pattern Recognition and Crowd Analysis* (2012).
- [4] Gonzalez-Barbosa, J.-J., García-Ramírez, T., Salas, J., Hurtado-Ramos, J.-B. et al.: Optimal camera placement for total coverage, *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 844–848 (2009).
- [5] O'Rourke, J.: *Art Gallery Theorems and Algorithms*, Oxford University Press (1987).
- [6] Zhao, J., Cheung, S.-C. and Nguyen, T.: Optimal camera network configurations for visual tagging, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Vol. 2, No. 4, pp. 464–479 (2008).
- [7] Qureshi, F. Z. and Terzopoulos, D.: Planning ahead for PTZ camera assignment and handoff, *ICDSC*, pp. 1–8 (2009).
- [8] Mittal, A. and Davis, L. S.: Visibility analysis and sensor planning in dynamic environments, *European conference on computer vision*, Springer, pp. 175–189 (2004).
- [9] Mittal, A. and Davis, L. S.: A general method for sensor planning in multi-sensor systems: Extension to random occlusion, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 76, No. 1, pp. 31–52 (2008).
- [10] Konda, K. R. and Conci, N.: Global and local coverage maximization in multi-camera networks by stochastic optimization, *Infocommunications Journal*, Vol. 5, No. 1, pp. 1–8 (2013).
- [11] Morsly, Y., Aouf, N., Djouadi, M. S. and Richardson, M.: Particle swarm optimization inspired probability algorithm for optimal camera network placement, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 12, No. 5, pp. 1402–1412 (2012).
- [12] 上嶋祐紀, 藤田和久, 樋口雄大, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫: ひとつつながるなび—位置と気持ちと空間の共有—, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2013) シンポジウム論文集, pp. 2105–2115 (2013).