

## 論文の内容の要旨

論文題目 予測モデルと観測データを統合した人物追跡手法の開発  
(Human Tracking by Integrating Simulation Model  
and Observation Data)

氏名 中西 航

様々な分野において人物挙動の詳細な把握が必要とされており、その自動観測手法構築への要請が高まっている。たとえば、駅構内や駅前広場、商店街やイベント空間などの公共空間における歩行者の挙動解析を行い、施設設計や流動制御に応用していくことが望まれている。監視・防犯システムやマーケティングへの応用においても、人物挙動の自動観測は有用である。このような適用対象を考えたときには、複数人物が相互依存して複雑に行動している状況下での、個々人の挙動を把握しなくてはならない。これまで、人物追跡は主として動画処理の一分野として行われてきた。十年來取り組まれているトピックであるが、自動追跡は今もチャレンジングな課題である。ゆえに、詳細な人物挙動の情報を取得する際には、手作業などにより多大な労力を費やしている。結果として、得られるデータ数が少ないため、歩行空間における人物挙動に関する知見の蓄積やサービスレベルの定量的な評価は難しく、施設設計や流動制御に向けた取得データの応用にも至っていない。一方で、詳細な人物の動きを考慮した計画を策定するために、交通工学の分野で人物の挙動特性をモデル化したシミュレーションモデルの開発が行われている。しかし、歩行者挙動は加減速や方向転換などの自由度が高くモデル化は容易でないため、複数人物を同時に対象としたマイクロなシミュレーションモデルは必ずしも精緻なものとなっていない。

動画処理に基づく人物追跡の難しさは、人物が時々刻々と色合いや形状を変化させたり、オクルージョンにより見えが変化したりするために、同一人物に対する観測データが時間経過とともに大きく変化する点にある。この意味で、観測データからの人物位置抽出には不確実性を伴う。また、人物は複雑な動きを行い、その動きの原理も未解明であるために、シミュレーションモデルすなわち挙動の予測モデルも不確実なものとならざるを得ない。このような不確実性の高い問題への有効なアプローチとして、数十年來、予測と観測を確率的に統合する理論が進展してきた。この理論は、予測モデルの性能を改善しつつ観測の誤差を修正することができるため、人物追跡手法との適合性が高いと考えられる。

以上の背景のもとで、本論文は、色・距離情報の観測データに対して歩行者挙動の予測モデルを統合し、複雑な状況下での新たな人物追跡手法構築を目的とする。このとき、人物追跡手法を、歩行者挙動を表す予測モデルとセンサから取得される観測データとを統合して、人物位置を逐次推定していく枠組みとして定式化する。また、歩行者挙動モデルの構造やそのパラメータは時間・空間により変化しうることを考慮して、同一の枠組みにおいて、得られる動線データから人物の挙動予測モデル自体も逐次推定していくことを考える。構築した手法を駅構内のデータに適用し、その有効性を検証する。

人物追跡を通じた人物挙動の詳細把握がもたらす可能性について、空間設計や流動制御を例に説明する。安全で快適な歩行空間を実現するために、混雑が発生する時点や地点、発生のトリガー、混雑の規模やその時間変化を理解したり、非混雑時に発生しうる局所的な混雑や交錯を予測したりして、空間設計や流動制御を行う際の評価に組み入れることが求められる。そのためには、人物のミクロな行動特性を把握し、現象が発生する仕組みを歩行者個々の挙動と関連づけて分析する必要がある。このようなことが可能になれば、カメラで観測を行いながら、蓄積された知見をもとに状況を判断し、混雑を未然に防ぎ歩行者流の交錯回数を減らすというような流動制御に繋がっていく。より具体的な例として駅改札の設置・制御を考える。従来は時間当たり利用人数をもとに設置台数を判断するなどの方法で行われている。これに対し、改札機ごとの利用人数や各改札機利用者の向かうホーム・出入口を把握できれば、改札機の設置位置や台数、開放の向きをより緻密に検討できるようになる。

本論文は、全7章で構成される。各章の内容の要約を以下に記す。

第1章(序論)では、研究の背景と目的を述べる。まず、従来のミクロな人物挙動把握へのアプローチと、それらが抱える問題点を概観する。これに対し、近年発展している予測モデルと観測データとを統合する理論の適用可能性を述べる。また、人物追跡手法の開発によりミクロな人物挙動把握が可能となった場合に生まれる可能性について説明する。これらを踏まえた上で、本研究では、人物自動追跡を予測と観測を統合する問題として捉えることとする。

第2章(既往研究の整理)では、本研究で対象とするミクロな人物挙動把握に関する既往手法を整理する。まず、観測データに基づく把握手法を概観し、歩行者個々に着目した従来の挙動分析における問題意識を整理する。次に、画像処理手法に基づく人物の自動抽出および追跡手法について、利用している特徴量の観点から整理する。さらに、シミュレーションに用いられる歩行者挙動モデルについて、考慮されている行動特性の観点から整理する。

第3章(予測モデルと観測データを統合する枠組み)では、予測モデルと観測データとを統合する枠組みを提示し、理論的な整理を行う。まず、予測モデルと観測データと

確率的に統合する手法であるデータ同化と、そのモデリング手法である状態空間モデルについて述べる。また、予測と観測を確率的に統合するフィルタリング理論が、非線形・非正規性を持つ複雑なシステムにも対応可能なものに拡張されてきたことを説明する。次に、データからモデルを推定するベイズ学習の観点から、予測モデルと観測データを関係づける。その上で、本研究で予測と観測を統合する枠組みとして、一般状態空間モデルの利用を検討する。一般状態空間モデルについて、構成要素の設定方法、状態推定の方法、構成したモデルの評価方法および実装のための計算手法について説明する。最後に、一般状態空間モデルを本研究において人物追跡手法に適用する枠組みを示す。

第4章(基礎手法の構築：人物挙動が時間・空間不変システムの場合)では、第3章における枠組みに基づき、人物挙動が従うシステムが時間・空間的に変化しない場合の人物追跡手法を構築する。はじめに、手法構築にあたって、一般状態空間モデルにおいてモデル化する必要がある構成要素を検討し、それぞれの構成要素に求められる要件を整理している。その上で、まず、初期分布設定に相当する人物抽出手法を、事後分布を用いる新たな手法として開発している。次に、システムモデルに相当する歩行者挙動予測モデルを開発している。ここでは、ミクロな行動特性を変数として組み込むとともに、逐次追跡を念頭に目的地を事前に外生的に与えないモデルとしている。最後に、観測モデルについて、既往の画像処理手法を援用して定式化している。以上により構築した自動追跡手法を実データに適用し、その性能を検証している。その際に、異なるシステムモデルを用いる場合との精度比較や、構成要素のモデル個々の精度検証も行っている。

第5章(システムモデルの逐次推定手法)では、第4章で構築した追跡手法を拡張し、人物挙動が従うシステムが時間・空間変化を有する場合を扱うことを念頭に、システムモデルの逐次推定手法を構築する。はじめに、一般状態空間モデルを利用してシステムモデルやパラメータを逐次推定する手法を整理する。その上で、モデル構造の候補の中からモデルを逐次選択する手法と、モデル構造が決定された状態でパラメータを逐次最適化する手法との二つを開発する。構築手法に基づいてモデルの逐次選択およびパラメータの逐次推定を行い、選択されるモデルやパラメータの事後分布の推移をまとめている。さらに、対象とした実データと照合することにより手法の性能を検証している。その際に、モデルの逐次選択やパラメータの逐次推定を行わない場合との比較も行っている。

第6章(拡張手法の構築：人物挙動が時間・空間変化を有するシステムの場合)では、第4章と第5章の成果をもとに、人物挙動が時間・空間について変化を有するシステムである場合の人物追跡手法を開発している。ここでは、色・距離情報をもとに人物を自動追跡し動線データを取得しながら、その動線データを用いて予測モデルとパラメータを逐次推定し、人物挙動モデルを最適化していく。構築した手法を実データに適用

し性能を検証する。また、応用例として、適用結果から乗客の利用改札選択や空間的な速度分布などを把握し、実データにおける状況との比較を通し検討を加えている。

第7章(結論)では、本論文の結論をとりまとめ、今後の展望を示している。

本論文では、人物挙動の詳細把握に向けた新たな人物追跡手法を開発した。ミクロスケールにおいて人物挙動の予測・観測の両手法を統合する枠組みを構築し、実データへの適用を通して、人物挙動が時間・空間によって異なる特徴を示す場合にも人物自動追跡が有効に機能することを示した。また、適用結果からは、今後の空間設計や流動制御に対する示唆が得られた。これらの成果より、提案手法は歩行空間のより詳細な評価・分析に資するものであるといえる。

なお、提案手法における予測・観測の両手法を統合する枠組みは、構成要素として定義される複数の確率モデルを組み合わせるという汎用性の高いものである。従って、提案手法を用いれば、今後の両手法の進展によって人物挙動に関するさらなる知見の蓄積が可能となる。また、本研究で扱っていないマクロスケールでの予測・観測両手法との統合など、様々な評価・分析対象における詳細な人物挙動把握手法への展開に貢献することも期待される。