

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：32652

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00137

研究課題名(和文) 人間と共存する環境で動作する移動ロボットのための人移動モデルに関する研究

研究課題名(英文) A study on a pedestrian model for mobile robots in human-robot co-existing environment

研究代表者

加藤 由花 (Kato, Yuka)

東京女子大学・現代教養学部・教授

研究者番号：70345429

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人と共存する環境で動作する自律移動ロボットを対象に、未来の人の移動状況を人移動モデルとして定式化することで、ロボットが安全かつ効率的な経路を自律的に生成する手法を提案した。具体的な研究成果は以下の2点である：(i) 一般的にSocial Force Modelとして知られる歩行者モデルを、ロボットの存在を前提としたモデルに拡張し、環境に適応しながら時間とともに変化していく人移動モデルを提案した；(ii) 機械学習アルゴリズムを用いて、大量の観測データから、未来の人の移動軌跡を系列データとして予測する手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：This study formulated the future moving state of a person as a pedestrian model in a human-robot co-existing environment for mobile robot navigation and proposed a method for safely and efficient path planning of autonomous mobile robots. The research findings are as follows: (i) the study enhanced the pedestrian model generally known as Social Force Model by using a human-robot mutual intention estimation model, and proposed a model varying over time according to environments; (ii) the study proposed a method based on machine learning algorithms to predict the future trajectory of a pedestrian as sequence data by using massive trajectory records collected by various sensor devices.

研究分野：情報学

キーワード：人移動モデル 移動ロボット ロボットとの共存 案内サービス 人属性推定 屋内環境センシング

### 1. 研究開始当初の背景

(1) コンシューマ向け低価格ロボットの登場など、ロボットは急速に人々の日常生活の場に入り込んできている。これらパーソナルサービスを行うロボットには、安全性の確保が不可欠であり、移動を伴うロボットでは特に、人との衝突回避が重要な研究課題になっている。これまでも、ロボットに搭載されたセンサにより人間との衝突を回避する研究や、環境側にセンサを配置することでロボットの安全な動作を実現する研究が広く行われてきたが、これらの研究は、人移動モデル生成時にロボットの存在や動作が人間の歩行に与える影響を考慮していない。また、人移動モデルでは、ユーザごとの属性や特性等は考慮されず、均一な人としてモデル化が行われている。センサネットワークの分野では、古くから環境センシングに関する研究が活発に行われており、近年ではモバイル端末、ウェアラブル端末などの普及により、個人の追跡や属性の特定等も可能になっている。本研究では、ロボットの存在や動作の影響を考慮するとともに、センサネットワーク分野でのこれらの研究成果を利用することで、実用的な人移動モデルの構築を目指す。

(2) 我々はこれまで、インターネット経由で遠隔地の案内を行う「案内サービス」を対象に、ロボットの存在する実環境に対する処理をモジュール内に隠蔽することにより、ロボット工学の知識を持たないソフトウェアプログラマでも、容易に移動ロボットを用いた案内システムの構築ができるプラットフォーム環境を提案してきた。本研究では、これらの研究成果を発展させ、環境側の案内ロボット（誘導ロボット）を対象に、安全性と効率性を両立させるシステムを実現する。

### 2. 研究の目的

(1) ロボットとの相互作用を考慮した人移動モデルの構築：人の案内や誘導を行うロボットを対象に、ロボットの存在や動作の影響を考慮した人移動モデルを構築する（図1）。ここでは、環境内に配置されたセンサにより人の歩行を観測し、移動速度の変化を環境に紐付けて測定することで、環境が人に与える影響度合いを蓄積する。具体的には、モバイル端末、ウェアラブル端末などから取得されるセンシングデータとの統合手法、環境内に誘導ロボットが存在する場合の人移動モデルへの反映方法を明らかにする。

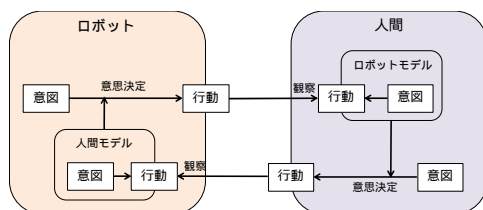


図1: ロボットと人の相互意図推定モデル

(2) 人移動モデルに基づいた移動予測アルゴリズムの開発：ある瞬間に観測された人間の位置を、確率誤差を考慮した粒子分布として表現し、人移動モデルに基づいて各粒子を移動させることで、移動予測を行うアルゴリズムを開発する。人移動モデルは、属性ごとにクラスタリングを行い、アルゴリズムの精度向上を目指す。

(3) ロボットの経路計画：移動予測アルゴリズムに基づいた、目的地までのロボットの経路生成手法を明らかにする。シミュレーション実験および実機実験を行い、ロボットと人の接近率を評価し、手法の有効性を検証する。

### 3. 研究の方法

(1) 人移動モデルの構築：環境内に測域センサ（Laser Range Scanner）を設置し、人の歩行データを収集する。収集したデータを解析し、測定地点に仮想的に設定したグリッド単位で、移動速度の変化量を算出し、その結果をデータベースに格納する。このとき、ロボットの存在や動作の影響を考慮するために、誘導ロボットを環境内に配備してデータを収集する。誘導ロボットとしては TurtleBot2 を、ロボット用ソフトウェアとしては ROS を利用する。ロボットにはネットワーク経由での遠隔操作機能と、SLAM 機能を搭載し、教示走行により地図作成を行った上で、遠隔地からオペレータが目的地を指定することで自律走行させる。収集したデータを統合し、人移動モデルとして定式化する。

(2) 移動予測アルゴリズムの開発：人移動モデル、および機械学習モデルを用いて予測アルゴリズムを開発する。機械学習モデルの構築においては、商業施設内を一般の歩行者が徒歩で移動するデータとして ATC pedestrian tracking dataset [1] を用いる。モバイル端末、ユビキタス端末などから取得したセンシングデータの分析結果を利用し、属性ごとにクラスタリングを行い、アルゴリズムの精度向上を目指す。

(3) ロボットの経路計画：人の存在確率の高い空間を回避する、人回避経路計画手法を設計する。手法の有効性を検証するために、シミュレーション実験、および実機による実験を行う。評価尺度としては、ロボットと人の接近率、目的地までの到着時間を用いる。提案手法と、人移動モデルを用いない手法と比較し、有効性を検証する。

### 4. 研究成果

(1) ロボットと人の相互意図推定モデルに基づく移動予測アルゴリズム、および経路計画手法の開発：Social Force Model (SFM) として知られる Helbing の歩行者モデル（人が環境から仮想的な斥力を受けると仮定し人の移動を推定するモデル）を、ロボットと

人間の相互意図推定モデルにより拡張し、これをロボットの存在を考慮した人移動モデルとして定式化した。このとき、ロボットは事前に設計されたベクトル場（速度場）により移動すると仮定し、これをロボットと人の相互意図推定モデルに組み込んだ。回廊内を周遊する人流が存在する場に、1台の移動ロボットが人と共存する環境を模擬するシミュレータを開発し、これを用いて人がロボットの移動を意識して動いた場合は、意識しないで動いた場合に比べ、ロボットとの接近率が低下するとともに、ロボットがゴールに到達するまでの時間が短縮することを示した（雑誌論文）。開発したシミュレータの画面を図2に示す。当初、観測データを用いたモデルの構築を予定していたが、SFMを拡張した手法を採用したため、モデル構築のためのデータ取得は不要になった。ただし、環境側センサによる歩行データの取得、人属性や状態の推定手法の検討は実施し、後述する研究成果（4項および5項）を得た。

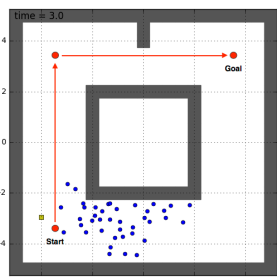


図2：開発したシミュレータの画面

(2) 機械学習モデルに基づく移動予測アルゴリズムの開発：当初の研究計画では、モデルベースのアルゴリズム開発を予定しており、(1)で述べた SFM に基づく移動予測アルゴリズムを開発した。一方、近年のニューラルネットワークをはじめとする機械学習技術の進展、利用可能な大規模データセットの出現等に伴い、アルゴリズムの見直しによる精度向上の可能性が出てきた。このような背景から、機械学習ベースの予測手法（観測データに基づくモデル）として、提案モデルの再構築を行った。具体的には、以下の2つの予測手法を提案した。一つは、データセットを用いてあらかじめ構築しておいた学習済み予測器（Support Vector Machine を利用）を用いて、歩行者の分岐方向を予測する手法であり（学会発表）、もう一つは、Recurrent Neural Network の一種である Sequence to Sequence モデル（LSTM encoder-decoder）を用いて、未来の人の移動軌跡を系列データとして予測する手法である（学会発表）。それぞれ、大規模データセットを用いた評価実験により手法の有効性を検証した。前者の処理イメージを図3に、後者の処理イメージを図4に、これらの人移動モデルを用いた場合の経路計画のイメージを図5に示す。

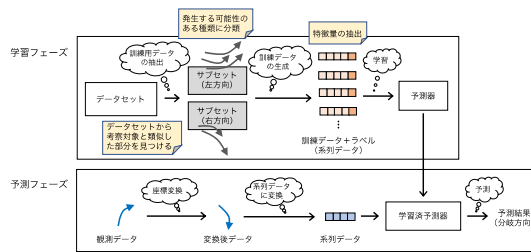


図3：分岐方向予測のための処理フロー

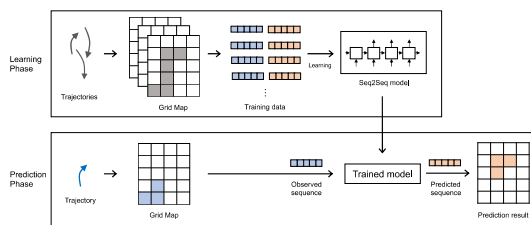


図4：系列データ予測のための処理フロー

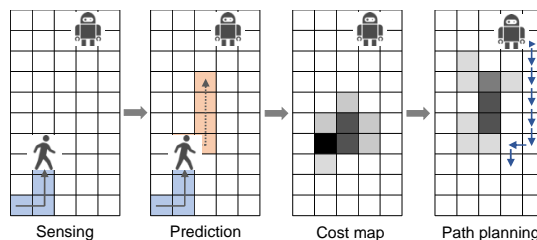


図5：人移動モデルの利用イメージ

(3) 人と共存する環境で動作するロボットサービスへの提案手法の適用：当初の研究計画では、提案手法は人の案内を行う誘導ロボットへの適用を前提にしていたが、コミュニケーションロボット等、人とのインタラクションを行うロボットの急激な普及に伴い、手法の適用範囲を拡張したサービス提案を行った。具体的には、据え置き型の受付ロボットを対象に、環境情報の推定結果（人の移動予測）をロボットと人とのインタラクションに利用するサービスを提案した（学会発表）。これにより、移動だけではなく、人と共存する環境で動作するロボットサービスへの提案手法の適用可能性を示した。

(4) 環境側センサによる歩行データ取得手法の提案：人移動モデル構築のために、単一の測域センサにより人の足首の動きを測定するシステムを開発し、測定結果から人移動データを算出する手法を考案した。ここでは、センサから人までの距離を時系列データとして取得し、バイズフィルタを用いてある時刻の人の位置を確率分布として推定する。足首の動きを測定することで、人移動データと合わせて歩容データの取得が可能になり、この結果から人属性（高齢者/若年者）の分類が可能になることを示した（雑誌論文）。



(5) 人が保持するモバイル端末による人属性・状態推定手法の提案：人属性や状態を推定する手法の検討結果として，ウェアラブル端末で測定される脈拍データを利用した，ストレス状態およびリラックス状態推定手法を開発した．ここでは，脈波のピーク間隔のゆらぎとストレス状態に関連があることを利用し，人状態を推定するための指標を提案した．被験者実験によりその有効性を検証した（雑誌論文）．

(6) 実ロボットを用いた遠隔ナビゲーションシステムの構築，およびネットワーク遅延の影響評価：実機実験の環境構築のために，実ロボットを用いた遠隔ナビゲーションシステムを構築した．システムの構成を図6に，実験環境を図7に示す．本研究では，当初予定していなかった機械学習モデルに基づく移動予測アルゴリズムの開発を優先したため，実機による評価実験は現状行えていない．一方，システムの構築にあたり，ネットワーク遅延の影響がナビゲーションに及ぼす影響が問題になり，遅延を組み込んだ制御モデルを設計するに至った（雑誌論文）．設計したグラフィカルモデルを図8に示す．ここでは，実環境における制御の集合  $a_j$  から遅延を組み込んだ制御  $A_j$  を生成し，観測の集合  $z_j$  から遅延を組み込んだ観測  $Z_j$  を生成することで，ベイズフィルタによりロボットの状態  $r_t$  を確率分布として推定する手法を提案した．



図6：遠隔ナビゲーションシステムの構成

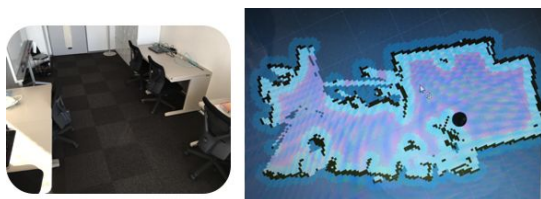


図7：実験環境（左）と構築した地図（右）

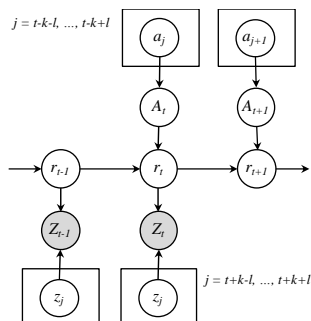


図8：設計したグラフィカルモデル

人とロボットが共存する社会においては，安全性の確保，特にロボットと人との衝突回避が重要な研究課題になっており，本研究で提案した人移動モデルは，この課題を解決するための重要な役割を果たすと考えられる．本研究成果の意義としては，移動ロボットの回避機構を実現することで，誘導ロボットを様々なサービスへ展開できる点が挙げられる．公共施設内での構内誘導（駅や空港での案内），店舗案内，買い物支援などは，人とロボットが共存する技術の実現により初めて可能になるサービスである．本研究では，さらに，移動だけではなく，コミュニケーションロボット等，人と共存する環境で動作するロボットサービスへの提案手法の適用可能性も示した．

<引用文献>

[1] D. Brscic, T. Kanda, T. Ikeda and T. Miyashita, Person position and body direction tracking in large public space using 3D range sensors, IEEE Trans. on Human-Machine Systems, Vol.43, No.6, pp.522-534, 2013.

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計9件)

Y. Kato, Y. Nagano and H. Yokoyama, A Pedestrian Model in Human-Robot Co-existing Environment for Mobile Robot Navigation, Proc. of IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2017), pp. 992-997, 2017, 査読有, DOI:10.1109/SII2017.8279352

S. Akiyama and Y. Kato, A Method for Estimating Stress and Relaxed States Using a Pulse Sensor for QOL Visualization, Smart Sensors Networks (Chapter 12), Academic Press, pp.261-290, 2017, 査読有, DOI:10.1016/B978-0-12-809859-2.00015-2

坂井 菜, 木村 純麗, 池田 貴政, 野見山 大基, 松日楽 信人, 加藤 由花, 測域センサにより取得される歩行パターンを利用した高齢者/若年者分別手法, 情報処理学会論文誌, Vol.58, pp.375-383, 2017, 査読有, <http://id.nii.ac.jp/1001/00177464/>

Y. Kato and M. Tanaka, Performance Evaluation of Remote Navigation with Network Delay for Low-cost Mobile Robots, Proc. of IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI 2016), pp.591-596, 2016, 査読有, DOI:10.1109/MFI.2016.7849551

S. Sakai, S. Kimura, D. Nomiya, T. Ikeda, N. Matsuhira and Y. Kato, Classification of Age Groups using Walking Data Obtained from a Laser Range Scanner, Proc. of the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2016), pp.5862-5867, 2016, 査読有, DOI:10.1109/IECON.2016.7793200  
成田 雅彦, 泉井 透, 中川 幸子, 土屋 陽介, 松日楽 信人, 加藤 由花, ネットワークを活用したロボットサービスのための非専門家向け開発フレームワークの提案, 日本ロボット学会誌, Vol.33, pp.807-817, 2015, 査読有, DOI:10.7210/jrsj.33.807  
Y. Kato, A Remote Navigation System for a Simple Tele-presence Robot with Virtual Reality, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2015), pp.4524-4529, 2015, 査読有, DOI:10.1109/IROS.2015.7354020

〔学会発表〕(計 20 件)

加藤 由花, 移動ロボットのための Sequence to Sequence モデルを用いた歩行者移動軌跡の予測, 人工知能学会全国大会, 2018.  
加藤 由花, インタフェースロボット応答制御のための歩行者分岐方向の予測, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会, 2018.  
加藤 由花, 移動ロボットのための環境に適應する人移動モデルの設計, 日本ロボット学会学術講演会, 2017.  
Y. Kato, A Delay-conscious Communication Model for Mobile Robot Navigation, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2017), 2017.  
Y. Kato, A Remote Navigation Method with Network Delay for Low-cost Mobile Robots, The IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (Ro-MAN 2016), 2016.  
秋山 早弥香, 装着型デバイスを利用した日常生活におけるストレス状態推定手法, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 由花 (KATO, Yuka)  
東京女子大学・現代教養学部・教授  
研究者番号: 70345429

(2) 研究協力者

秋山 早弥香 (AKIYAMA, Sayaka)