

令和元年9月10日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00351

研究課題名(和文)空間的な間(ま)を読みながら自律的に行動するロボットに関する研究

研究課題名(英文) Study on an autonomously behaving robot with recognizing implicitly inhibited spaces formed by multiple people and objects

研究代表者

金子 正秀 (Kaneko, Masahide)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：90262039

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)：複数人や物によって形成される空間的な間を読みながら賢く振舞うことが可能な自律行動型ロボットの実現に向けて、以下の研究成果を得た。まず、ロボットの安全かつ自然な移動のための環境認識として、動物体(歩行人物)の影響を受けない地図生成方法を考案した。次に、物体の潜在的な占有空間や混雑状況を考慮した自動経路生成方法を開発した。複数ユーザに対する頑健な行動検出と追跡、ユーザグループの動きに適した柔軟な案内行動の実現を図った。また、複数人や物によって形成される空間的な間の意味を動的に解釈すると共に、混雑度に応じて安全な経路を柔軟に自動生成する方法を考案し、シミュレーション実験により動作の検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会構造の変化やAI技術の進展に伴い、今後、日常生活空間において人間と共存し、人間と様々に係わり合いながら自律的に行動するロボットに対する需要の高まりが予想される。このようなロボットにおいては、単に部屋や廊下の形状や障害物を認識するだけでなく、周囲の人物との係わり合いや物によって形成される潜在的に立ち入りを控えるべき空間(すなわち、空間的な間(ま))を考慮し、周囲の人物に衝突したり不快感を与えることがないように移動経路の生成や行動形態の選択を行うことが不可欠である。本研究はこのために必要な手法を提供するものであり、今後の人間共存型ロボットの発展にとって学術的にも、社会的にも重要なキーとなる。

研究成果の概要(英文)：An autonomously behaving robot with recognizing implicitly inhibited spaces formed by group of people and objects has been studied from the viewpoint of practical applications to real daily lives. Firstly, the method to generate an environment map without being affected by the pedestrians for the safe and natural movement of robot. Next, the autonomous path planning method that considers the potentially occupied spaces by objects and the degree of crowdedness. The robust behavior detection and tracking of multiple users, and the flexible guiding behavior adapted to the movement of user group have been realized. Furthermore the method to dynamically recognize implicitly inhibited spaces formed by the multiple people and objects and to generate safe paths flexibly has been developed. Simulation experiments have verified the effectiveness of the proposed methods.

研究分野：総合領域

キーワード：知能ロボティクス 自律移動 ユーザインタフェース 人工知能 画像認識 空間的な間(ま)

1. 研究開始当初の背景

近年、人間の日常生活の場に入って、人間に対して様々な支援やサービスを行う人間共存型のロボットに関する研究が国の内外で盛んになってきている[1, 2]。この様なロボットが備えるべき機能の一つとして、自律移動の機能が挙げられる。自律移動ロボットに関しては、ロボット単独での自律移動時における障害物回避や経路探索に関する研究が活発に行われてきている。また、複数台のロボットを連携して移動させる研究も行われている。

一方、日常生活空間において人間と共存し、人間と係り合いながら行動するようなロボットにおいては、部屋や廊下の形状や障害物を認識するだけでなく、周囲の人物との係り合いの中で自らの行動形態、移動経路を自律的に決めていく機能が必要となる。まず、廊下等幅が狭い通路での移動時に、対向歩行者との安全なすれ違いを行う機能が挙げられる。対向歩行者の挙動を随時観測し、阿吽の呼吸で衝突回避を行えるようにする必要がある。一方、ロボット単体での移動ではなく、人間の同行者を伴った移動の問題がある。同行者との同行を継続しつつ、対向歩行者や障害物との衝突回避を行う。高橋ら[3]は同行形態の基本を並走とし、対向歩行者が来たり、障害物があって一人分の道幅しか確保できない場合には、並走から縦走に滑らかに自律的に同行形態を変化させ、通り過ぎたら並走へ戻る方法を示した。更に、ポテンシャル法をベースとした改良手法として、中澤ら[4]は同行用斥力ポテンシャルを導入し、対向歩行者の動き、障害物に応じたより滑らかな並走と縦走との自律的切り替え動作を実現した。

本研究では、複数人のグループや物によって形成される様々な空間的な間（ま）を読みながら、自律的に行動できるロボットの実現に向けた検討を行う。単に人間や障害物の位置関係（2人の人間の間の距離による、ロボットが通れるスペースの有無の判断等）を考えるだけでなく、各人の社会的属性、各人の移動可能性（移動方向も）、空間的な間（ま）に対する解釈（例えば、通行の適否。物理的に通行可能であっても、2人の人が少し離れて向かい合って話をしているケースなど、通行しない方が良い場合もある。）、移動コスト（移動距離、移動時間）等を多重的に勘案し、自らの行動を決めるといふ、言わば、間（ま）を読むことが可能なロボットに着目する。具体的には、主に、(a)ロボットによる案内行動（複数人との一定の間（ま）を保ちながらの移動）、(b)複数人のグループや物によって形成される様々な空間的な間（ま）が存在する複雑環境内での自律移動、の2つを取上げる。

文献

- [1] R. Siegwart et al. : “Introduction to Autonomous Mobile Robots (2nd Ed.),” MIT Press, 2011.
- [2] 松原、他編：“ロボット情報学ハンドブック,” 近代科学社, 2010.
- [3] 高橋和也、金子正秀：“同行者との相対的位置関係を考慮した日常環境下でのロボットの自律的移動,” 映像情報メディア学会誌, vol.65, no.10, pp.1452-1457, 2011.10.
- [4] 中澤和至、高橋桂太、金子正秀：“動的環境に適応したポテンシャル場の生成に基づく並走・縦走ロボットの移動制御,” 電気学会論文誌C, vol.134, no.2, pp.293-302, 2014.2.

2. 研究の目的

本研究課題では、多くの人が様々に集うような場所で、複数人のグループや物によって形成される様々な空間的な間（ま）を読みながら、自律的に行動できるロボットの実現に向けた、以下の研究開発を目的とする。

(1) 環境認識及び移動経路生成

① 物体の潜在的な占有空間の解析 : 日常的な環境で、物体（人物と物）の属性を考慮し、物体の周辺に物が実在しないが、潜在的に使用されている空間（潜在的な占有空間と呼ぶ）を理解しながら、事前地図に反映できるようにする。

② 移動経路の自動生成 : LRF及び Kinectによって得られる2次元と3次元の情報を合せて、ロボットが働く環境に対してよりロバストな経路生成を効率良く行えるようにする。

③ 混雑状況下での移動経路生成 : 混雑状況も含めた日常環境下において、ロボットから得られる情報のみを利用して自動的に移動経路生成を行えるようにする。

(2) ユーザグループに対するロバストな行動検出と追跡

ロボットが複数人のグループの行動の状況を把握し追跡できるようにするために、複数人の検出、個人認証、追跡に係るシステムを開発する。

(3) 複数人に対する案内行動

目的地に向けて進むだけでなく、案内途中で被案内者が立ち止まった場合、歩行がゆっくりになった場合、或いは後戻りした場合などの状況に応じて、被案内者の行動を優先して、ロボ

ットも立ち止まる、被案内者にあわせた移動スピードにする、被案内者に追従するなど、被案内者との間の間（ま）の意味を考えた行動を行う様にさせる。この際、常に本来の案内行動に速やかに戻れるような位置関係を保つようにする。

(4) 空間的な間（ま）を考慮した自律移動

環境に対する地図に加えて、人間や障害物の位置関係、各人の移動可能性（移動方向も考慮）、空間的な間（ま）の意味に対する解釈等に基づき、ロボットの移動経路を柔軟に調整できるようにする。

(5) 人とのインタラクションを介した経路生成

周囲の人とインタラクションしながら適切な移動経路を生成できるようにする。

3. 研究の方法

(1) 環境認識及び移動経路生成

① 物体の潜在的な占有空間の解析 : 単にロボットの周囲の物体を障害物として回避させるだけでなく、物体の属性を分析し、周辺の空間の使用状況を潜在的な占有空間として定量的に解釈し、通行可能性（人間から見た違和感や人物に対する不快感）を考慮した行動をとることが可能なロボットに着目する。複数の人物だけでなく、人物とインタラクションしている物と物自身に潜在的な占有空間を持たせ、潜在的な占有確率モデルで解釈する。

② 移動経路の自動生成 : 動領域と不動領域を考慮して効率的な経路生成を行う。

③ 混雑状況下での移動経路生成 : 混雑状況も含めた日常環境下でのロボットから得られる情報のみを利用した自動経路生成を行えるように時空間 RRT 手法を拡張する。

(2) ユーザグループに対するロバストな行動検出と追跡

Kinect センサにより取得した情報に基づく個人認証、認証結果を観測尤度として用いたパーティクルフィルタ（PF）を用いて検出と追跡を行う。

(3) 複数人に対する案内行動

統合ポテンシャル場に基づいてユーザグループの動きに適応した移動制御モデルを開発する。

(4) 空間的な間（ま）を考慮した自律移動

① 空間的な間の検出 : F 陣形の考え方と k-means 法を組合せて空間的な間を検出する手法を開発する。

② 空間的な間を考慮した移動ロボットの経路生成 : 空間的な間に侵入しないような経路を RRT によって生成する手法を開発する。

③ 複数人や物によって形成される空間的な間の意味を解釈した経路生成

混雑度によって個人空間の大きさを変化させ柔軟な経路生成を行えるようにする。

(5) 人とのインタラクションを介した経路生成

周囲の人とのインタラクションの仕方、経路選択の仕方を検討する。

4. 研究成果

(1) 環境認識及び移動経路生成

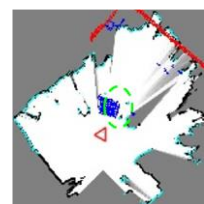
① 物体の潜在的な占有空間の解析

日常空間に存在する物体（人物と物）を高精度で認識し、属性を理解するためには、日常空間での物体（人物と物）の画像データを大量に収集し、深層学習モデル YOLO で学習する。ロボットに Kinect センサを搭載し、移動する際に取得した画像情報を学習したモデルで認識する。認識した人物の姿勢と顔を分析し、周りの人物と物との関わり（対象物体とインタラクションをしているかどうか）を認識する。認識結果に基づいて潜在的な占有空間の範囲と強さを SLAM で事前に生成した地図に反映する。これにより、特定の状況に合わせてケースバイケースでロボットの機能を増やす必要がなくなり、ロボットに、より自然に、また人間に優しい行動を汎用的にさせることが期待できる。図 1 は LRF と Kinect によって得られた 2、3 次元情報の組合せによるマッピング結果の例である。

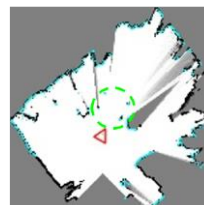
② 移動経路の自動生成



(a) 机があるシーン



(b) 2, 3 次元センサによる



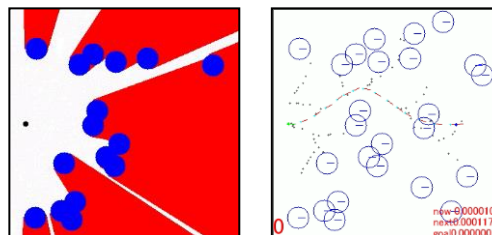
(c) 2 次元センサによる

図 1 異なるセンサによるマッピング結果

3次元情報によって認識した壁等の不動領域は地図上に早めに反映させる。一方、人物が存在する動領域は地図上から削除する。次に、大局的手法と局所的手法を統合してロボットの移動経路の生成を行う。ダイクストラ法に基づく最終目的地までの最短経路の生成、及び、ポテンシャル場法に基づく局所的な移動により、動的な環境下での効率的な移動が可能となった。

③ 混雑状況下での移動経路生成

ロボットから得られる情報のみを利用して経路生成を行えるように拡張した時空間RRT手法を考案した。まず、(i) オクルージョン領域の境界線上にサンプリング障害を行う領域を付与することにより、障害物を回り込むような経路を生成し、オクルージョン領域から移動してくる障害物との衝突確率が下がるようにする。次に、(ii) 歩行者の前方では特に衝突確率が高いため、サンプリング障害を行う領域を変形させ、前方を通る経路を選択させるべくする。更に、(iii) 混雑状況に応じてサンプリング障害確率を変更させることにより、混雑度の低い環境では衝突確率のより低い経路が、混雑度の高い環境では目的地までたどり着くことができる経路が高速で生成されるようにする。様々な環境を用いて経路生成のシミュレーション実験を行った結果、本手法により衝突確率が低下することを確認した。図2に移動経路の生成結果例を示す。



(a) 障害物がある環境 (b) 経路生成例
図2 ロボットから観測できる情報のみでの移動経路生成

(2) ユーザグループに対するロバストな行動検出と追跡

ユーザグループの追跡システムには、ロボットに搭載した Kinect センサを利用する。各ユーザの顔、色などの個人情報を統合して個人認証を行い、その結果をパーティクルフィルタの観測尤度として利用し、他の歩行者と区別しながら、複数人のユーザグループの追跡を行う。図3に人物追跡結果例を示す。



(a) 案内シーン (b) Kinect センサによる追跡結果

図3 案内ロボットにおける人物追跡結果

この手法の有効性を評価するために、保育園での子どもたちの動きを追跡した。16人の子どもたちを含めた保育園のリトミック授業を複数の Kinect センサで撮影し、得られる深度情報を用いて子どもの検出を行うと共に、カラー画像を用いて個人認識を行う。オクルージョンの影響により検出・認識ができない場合や、子どもの位置によっては個人認識が困難な場合があるため、パーティクルフィルタを用い、人物検出・個人認識結果をもとに追跡する。実際に保育園で計測したデータを使用して、提案した複数人の行動追跡システムの有効性を示した。また、保育士の実際のニーズに合わせた情報を自動的に提供できる可能性を示した。図4に保育園児の行動追跡結果の例を示す。



(a) リトミック授業シーン (b) 複数台の距離センサによる追跡結果
(c) PFによる追跡結果

図4 保育園児の行動追跡結果の例

(3) 複数人に対する案内行動

統合ポテンシャル場に基づいてユーザの動きに適応した移動制御モデルを考案した。ユーザたちをグループとして扱い、各ユーザの位置の平均を取った全体としての平均位置の動きにロボットを適応させる。目的地に関しては、最終ゴールからロボットに直接影響を与えると、ロボットが環境中の障害物などの配置を考慮せず、直接最終ゴールに向かって移動するため、通れない道を最初を選び、結局遠回りする可能性が高い。そこで、事前地図を用いて生成した最短経路から、固定間隔のサブゴールを先に生成し、ロボットの動きに影響を与える。潜在的な占有空間を含めた環境全体と局所での障害物や動物体を同時に考慮した最適な経路でユーザを

案内する。ユーザグループ全体の現在位置とサブゴール両方からの引力ポテンシャルを設定し、障害物や潜在的な占有空間などからの斥力ポテンシャルと統合し、ユーザの動きと案内タスクの実現を考慮した思いやりを持った移動モードを自動的に生成する。提案したロボットは基本的にユーザグループの速度に合わせて、目的地まで誘導するという誘導モードで動くが、ユーザグループと最適な相対距離を維持しながら誘導を行うため、ユーザ達が止まると、ロボットも止まって待機する。ユーザ達の動きに制限がないため、環境の中で興味を持っているところに寄り道をし、元の経路から外れたときは、ロボットは追従モードに変更し、ユーザグループに追従する。ユーザグループがもう一度ロボットに近づいたとき、元のタスクに戻ると判断し、誘導モードを再開する。ただし、ロボットが追従モードで動く場合はユーザグループに追従するだけでなく、常に目的地を考慮し、誘導の再開に対応しやすい位置で待機しながら、ユーザグループの隣でついていく。ユーザグループが元のタスクに戻ってくると、ロボットは短い反応時間で、無駄な経路を通らず、スムーズに誘導を再開することができる。ユーザグループの安全を確保した上で、安心感と快適感を与えて、案内タスクを実行するため、実生活空間における人間共存型ロボットの利用の幅が広がることにも貢献できる。図5、6に一時的にロボットに従わずに行動しているユーザに対する案内シーン、及び移動軌跡の例を示す。

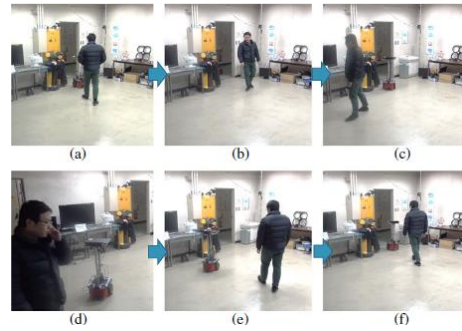


図5 一時的にロボットに従わず部屋の中を歩き回っているユーザに対する案内

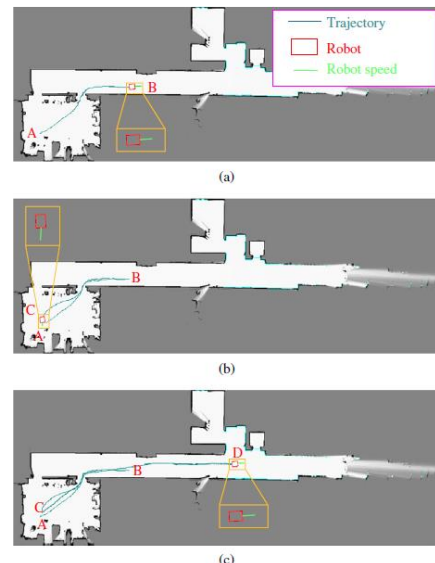


図6 図5の案内行動における移動軌跡

(4) 空間的な間 (ま) を考慮した自律移動

① 空間的な間の検出

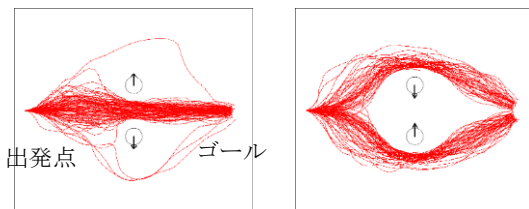
他者とインタラクションを行っている時にロボットに通過させると不快に感じるような空間的な間 (グループに拡張されたパーソナルスペース) を、F 陣形の考え方とk-means 法を組合せて検出する手法を考案した。狭い空間にグループが複数存在していてもグループ分類の精度の向上を図ることができた。

② 空間的な間を考慮した移動ロボットの経路生成

物理的な空きスペースに対するコスト計算に基づく従来の経路生成手法に対して、複数人によるグループの形成及び空間的な間の存在を判定し、そこに侵入しないような経路をRRTによって生成する手法を考案した。複数人により形成される空間的な間に侵入せず、人に不快感を与えない経路生成を実現することができた。

③ 複数人や物によって形成される空間的な間の意味を解釈した経路生成

人の個人空間への侵入を避けようとする混雑時にはロボットの移動経路が生成しにくくなる。そこで混雑度によって個人空間の大きさを自動的に変化させ、経路を生成しやすくする。経路生成時には、個人空間モデルで計算した個人空間外縁部の閾値によって経路候補点に対するサンプリングの仕方を変化させ、また、衝突判定を行う。人と人の関係性だけではなく、人と物の関係性のモデルも提案した。シミュレーション実験を行い、空間的な間を考慮した経路を生成できることを検証した。図7に人物間の関係性に応じた経路生成の違いの例を示す。



(a) 背中合わせ (b) 対面
図7 人物間の関係性に応じた経路生成

(5) 人とのインタラクションを介した移動経路生成

自律移動ロボットが経路上にいる人とインタラクションを行い、その結果に応じて移動の仕方を柔軟に変化させる手法を考案した。Smooth Nearness Diagram手法を局所的な経路計画に用い、人の検出にはYOLO手法による画像認識を用いた。人とのインタラクションは主に音声会話によって行った。ロボットは最適と判断した領域の通過の許可を求める質問を行い、人からの許可や拒否の内容に応じて自らの行動及び移動経路を選択する。実機実験により、本手法の有用性を確認した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① B. Zhang, T. Nakamura, and M. Kaneko : “A framework for adaptive motion control of autonomous sociable guide robot,” IEEJ (Institute of Electrical Engineers of Japan) Trans. on Electrical and Electronic Engineering, vol.11, no.6, pp.786-795, Nov. 2016. (査読有)
- ② B. Zhang, T. Nakamura, R. Ushioji, T. Nagai, K. Abe, T. Omori, N. Oka, and M. Kaneko : “Simultaneous children recognition and tracking for childcare assisting system,” Journal of Signal and Information Processing, vol.7, no.3, pp.160-174, 2016. (査読有)

[学会発表] (計12件)

- ① ト憲輝、中村友昭、金子正秀 : “個人空間を考慮した時空間 RRT による自律移動ロボットの動的経路生成,”情報処理学会第81回全国大会, 6R-03, 2019.3.16.
- ② 張斌、金子正秀、林憲玉 : “自律移動ロボットのための物体の潜在的な占有空間の解析,” 情報処理学会第81回全国大会, 1D-05, 2019.3.14.
- ③ ト憲輝、中村友昭、金子正秀 : “複数人や物によって形成される空間的な間の意味を解釈しながら経路生成を行う自律移動ロボット,”映像情報メディア学会技術報告, メディア工学研究会, ME2019-18, 2019.2.9.
- ④ B. Zhang, M. Kaneko, and H. Lim : “Object recognition based robust mapping for the autonomous mobile robot under dynamic environment,” 10th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 19th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS2018) in conjunction with ISWS2018, Toyama, Japan, Dec. 5-8, 2018. (査読有)
- ⑤ B. Zhang, M. Kaneko, and H. Lim : “Robust mapping for the autonomous mobile robot considering potential occupied spaces of objects,” 9th International Workshop on Advances in Networking and Computing (WANC'18) in conjunction with CANDAR'18, Hida Takayama, Japan, Nov. 27-30, 2018. (査読有)
- ⑥ 中村和樹、中村友昭、金子正秀 : “混雑状況におけるローカル情報を用いた時空間 RRT による自律移動ロボットの動的経路生成,” 映像情報メディア学会技術報告, メディア工学研究会, ME2018-67, 2018.2.24. (優秀発表賞受賞)
- ⑦ 中村和樹、中村友昭、金子正秀 : “ローカル情報を用いた時空間 RRT による自律移動ロボットの動的経路生成,” 第60回自動制御連合講演会, FrSP1-8, 2017.11.10.
- ⑧ 張斌、中村友昭、金子正秀 : “自律案内ロボットにおけるユーザグループの認識と追跡を同時に行うシステム,”情報処理学会第79回全国大会, 2C-01, 2017.3.16.
- ⑨ B. Zhang, T. Nakamura, R. Ushioji, T. Nagai, K. Abe, T. Omori, N. Oka, and M. Kaneko : “Robust children behavior tracking for childcare assisting robot by using multiple Kinect sensors,” 8th Int. Conf. on Social Robotics (ICSR 2016), pp.640-649, Nov. 3, 2016, Kansas City, USA. (査読有)
- ⑩ 張斌、中村友昭、阿部香澄、アッタミムハンマド、長井隆行、大森隆司、岡夏樹、金子正秀 : “複数の Kinect を用いた子どもの行動追跡及び個人認証,”2016年度人工知能学会全国大会, 4K4-1, 2016.6.9.

[その他]

ホームページ <http://www.kaneko.lab.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

研究代表者

金子 正秀 (KANeko, Masahide)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号 : 90262039