

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330304

研究課題名(和文) 周囲環境の変化や同行者の属性に応じて同行形態を動的に変化可能な自律移動ロボット

研究課題名(英文) Autonomous mobile robot that can dynamically adjust accompanying behavior according to the change of environments and attributes of companions

研究代表者

金子 正秀 (Kaneko, Masahide)

電気通信大学・情報理工学(系)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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)： 同行者との位置関係を柔軟に変化させながら自律移動を行うロボットの実現に向けて、以下の研究成果を得た。同行者との位置関係の制御のために、ポテンシャル場法に基づく動的環境下での並走・縦走の自律的切替え、手つなぎポテンシャル(引力)や光源と影との関係に基づく影ポテンシャル場法の導入によるより柔軟な制御の実現を図った。また、移動型テレプレゼンスロボットにおけるユーザとの同行動作について実機実験による検証を行った。更に、複数人のグループを対象として、相手に思いやりを感じさせる案内行動を自律移動ロボットに行わせることが可能なフレームワークを構築した。

研究成果の概要(英文)： An autonomous mobile robot that can properly adjust its relative position to companion(s) has been studied from the viewpoint of its practical applications to real daily lives. Firstly, the methods to control the position of robot relative to companion(s) based on the idea of artificial potential fields are studied. An autonomous switching method between parallel and cascade positions under the complex dynamic environments, an introduction of hand-in-hand potential field, a shadow potential method based on the relation between light source and shadow have been developed. Next, accompanying movements by a mobile type telepresence robot have been verified by the experiments using a real robot. Furthermore, an autonomous guiding robot that can give the feeling of consideration to a group of people has been developed.

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

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盛んになってきている。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、人間と行動を共に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移動形態、移動経路を自律的に決めていく機能が必要となる。この様なロボットを考えた場合、先行する人間の動きに追従するだけでなく、人間と同行し、同行者の動きと周囲環境（障害物や他歩行者）の状況に応じて、同行者との位置関係を考慮しながら自律的に移動できる機能が不可欠である。例えば、人間が2人で廊下を歩行する際、一般的には横に並んだ「並走」の形態で歩行する。しかし、対向歩行者とすれ違う際には、道幅が狭くなるため「縦走」の形態に自然に移行する。この形態変化については、2人のどちらが先に進むのかを互いに瞬時に判断して行っている。この様な動作を自律的に行うことができるロボットに関する研究については、まだ取組みが始まった段階であり、以下に述べる限られた条件・環境下での研究に限られている。花井ら[1]は同行するユーザの動きに合わせて、並走→縦走、縦走→並走の移動モードを予め幾つかロボットに用意しておき、これらのモードを自律的に切替える方法を提案している。この研究では、ロボットとユーザの位置関係は大きく分けて並走と縦走の2パターンであるため適用環境が限られてしまう。小林ら[2]は並進する介護者の進みたい方向を察知する自律移動車椅子を提案している。一人の介護者との移動を対象とし、ロボットは介護者と並走するモードと介護者に追従するモードを切替えながら移動する。しかし、実際の生活空間において、ロボットと同行者との移動形態は複雑に変化し得る。高橋ら[3]は、花井らの研究を改良し、同行者の周囲に設定した円環状の引力ポテンシャルと、対向歩行者や進行方向上の障害物による斥力ポテンシャルを考慮し、ロボットと引力ポテンシャル（同行者）の間に斥力ポテンシャルを検出した場合に、一時的にサブゴールを設定し、並走から縦走への切り替えを行うことにより衝突

回避を行えるようにした。これにより、同行者との並走、同行者の後方追従、同行者の前に位置、という相対的位置関係を自律的に切替えることが可能になったが、まだ、対向歩行者一人、或いは人物一人程度の大きさの障害物が対象であり、適用範囲が限定されている。また、より多様な同行形態への対応は難しい。

これに対して本研究では、周囲環境の変化や同行者の属性に応じて同行形態（同行者との相対的位置関係や距離）を動的に変化可能な自律移動ロボットについて検討を行う。

文献

- [1] 花井久美江、今井順一、金子正秀：“画像情報に基づき自律的にユーザとの並走・縦走の切替えが可能なロボットの実現,” 電子情報通信学会技術研究報告, 画像工学, IE2006-285, 2007.
- [2] 小林貴訓、金原悠貴、久野義徳：“周辺状況を考慮して介護者と協調移動するロボット車椅子,” 第16回画像センシングシンポジウム, IS-1-12, 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.

2. 研究の目的

本研究課題では、同行者との位置関係を柔軟に変化させながら自律移動を行う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) 複雑な実環境下における自律移動のための人物・環境認識

ロボットがユーザに同行しながら周囲状況の動的変化に応じた移動を行うための基本として、周囲環境の把握、自己位置推定、同行者や複数の周囲歩行者の位置・動きの検出などの技術の開発、性能の改善を図る。

(2) 死角領域、動的障害物を考慮した経路生成

移動ロボットのセンサの死角領域や動的障害物の移動の曖昧性を考慮した、安全性確保と移動効率の向上を目的とした速度制御手法と経路生成法を開発する。

(3) 同行者との同行形態の制御

ポテンシャル場法をベースとして、同行者との縦走・並走の切替えを基本とした同行形態の制御を柔軟に行う方法を開発する。移動型テレプレゼンスロボットを具体例として、シミュレーションや実機実験により、同行動作の検証を行う。また、より複雑な同行形態として、複数人のグル

ープを対象とした案内行動を取上げる。相手に思いやりを感じさせる案内行動を自律移動ロボットに行わせることが可能なフレームワークを構築する。

3. 研究の方法

(1) 複雑な実環境下における自律移動のための人物・環境認識

移動人物や移動物体のある動的環境下で、ロボット周囲の地図の自動生成、及び自己位置推定を行う方法を開発する。また、同行移動の対象としての同行者の認識を行う。

(2) 死角領域、動的障害物を考慮した経路生成

① 速度制御にはセンサ情報と事前地図を利用する。死角や障害物の存在に応じて実時間でロボットの移動速度を変化させる。また、安全性と移動時間を考慮した大域的経路生成を行う。

② 時空間RRT(Rapidly-exploring Random Tree)に動的障害物の移動量の曖昧性を考慮したモデルを組み込んだ自律移動ロボットの経路生成法を開発する。

(3) 同行者との同行形態の制御

① ポテンシャル場法 : ポテンシャル場法に基づいて、自律移動ロボットにおいて動的環境下での同行者との並走・縦走の自律的切り替えを行う方法を開発する。

② 手つなぎポテンシャルによる同行者との位置関係の制御 : ロボットが仮想的に人と手をつないで同行移動することを目的とした手つなぎポテンシャルについて検討する。

③ 影ポテンシャル場法による同行者との位置関係の制御 : 従来のポテンシャル場法では、ロボットと障害物との距離のみを考慮し、動的障害物の移動方向は考慮されていない。この問題を解決するために、距離と移動方向の双方を考慮した「光源と影との関係に基づく影ポテンシャル場法」を検討する。

④ 移動型テレプレゼンスロボット : 人に同行しながらサービスを提供する自律移動ロボットの具体例として、移動型テレプレゼンスロボットがある。このロボットでは障害物が存在したり歩行者が行き交う環境において、周囲の変化に応じて同行者との位置関係を調整しながら同行移動を行い、遠隔地の相手と同行者との間での会話を維持できるようにする必要がある。このために同行移動に最適化した人工ポテンシャル場を用いた方法を検討する。シミュレーションと実機実験により、有効に動作することを明らかにする。

⑤ 案内ロボット : 自律移動ロボットにお

いて、複数人のグループを対象として、相手に思いやりを感じさせる案内行動を行わせることが可能なフレームワークを構築する。

4. 研究成果

(1) 複雑な実環境下における自律移動のための人物・環境認識

移動人物や移動物体のある動的環境下で、ロボット周囲の地図の自動生成、及び自己位置推定を行う方法を開発し、論文としてまとめた。高さを違えた2台のLRFを用い、周囲人物の胴の位置と足の位置を検出し、両者の位置の一致により、人物位置の検出精度を確保した。

初期状態においてロボットに一番近い位置にいる人物を同行者として認識させ、追跡を継続することにより、同行者を他の人物と識別した。

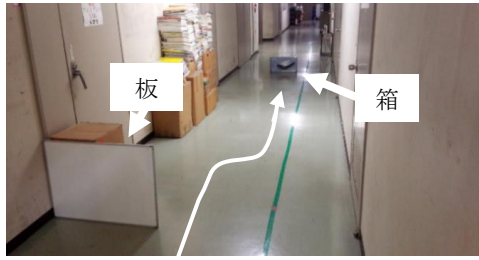
(2) 死角領域、動的障害物を考慮した経路生成

① 死角領域を考慮した速度制御手法及び経路生成法

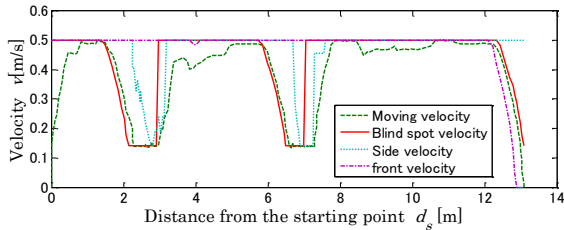
危険箇所や場所ごとの適切な速度などを予め登録する必要がなく、事前地図に存在しない物体の出現によって発生する死角も考慮した上で、リアルタイムでロボットの移動速度を変化させる。この際、ロボットの移動時間は原則として短いことが望ましい。ここでは移動時の安全性を考慮するため、安全性が高い経路ほど移動速度が速くなり、逆に、安全性が低い経路では移動速度が遅くなる。そのため結果的に、最短距離経路に対する移動時間が必ずしも最小とはならない可能性がある。そこで、安全性を確保した上で移動時間を最小にする2地点間における大域的経路生成を行った。以上についてシミュレーション及び実機実験により有用性を検証した。図1は、事前地図に存在しない物体によって環境が変化しても、事前地図と現在の実環境を比較することで対応可能であることを示した実験結果の例である。(a)は事前地図に存在しない板と箱を移動経路上に設置した実環境の写真である。図中の矢印はロボットの移動経路を模擬的に表したものである。(b)はスタート地点からの移動距離を横軸に取って実機実験時の移動速度と減速要因による速度の変化を示したものである。事前地図には存在しない物体があった場合にもその環境に合わせて速度制御がなされていることが確認できる。

② 動的障害物の移動量の曖昧性を考慮した自律移動ロボットの経路生成法

動的障害物の移動量の曖昧性を考慮した時



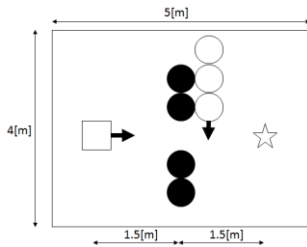
(a) 事前地図に存在しない物体（板、箱）が存在する環境



(b) ロボットの移動速度の変化

図1 事前地図とは異なる環境での移動

空間RRTによる自律移動ロボットの経路生成手法を考案し、シミュレーションにより有効性を検証した。局所的にサンプリング確率を変化させることで、動的障害物のすぐそばを通るような危険な経路は選択されにくくなるようにし、より安全な自律移動を行えるようにした。図2 に経路生成シミュレーションの結果例を示す。



(a) シミュレーション環境



(b) 経路生成シミュレーションの結果

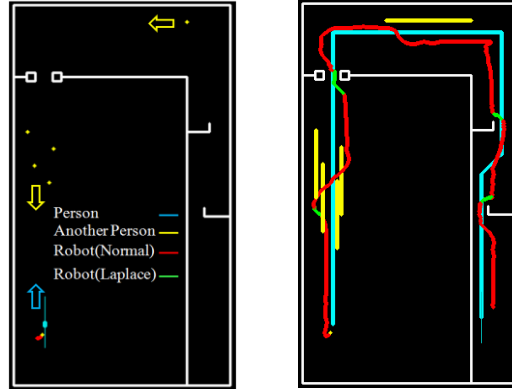
図2 経路生成シミュレーションの結果例

(3) 同行者との同行形態の制御

① ポテンシャル場法

基本的には、同行者に引力を、同行者以外の人物や物に斥力を与えてポテンシャル場を形成し、ポテンシャルが最小になる位置にロ

ボットを移動させる方法を用いる。この考え方に基づく動的環境下での並走・縦走の自律的切替えを実現し、論文としてまとめた。図3に、複数の対向歩行者や、ドアの通り抜けによるデッドロック等の動的要素を含んだ環境において、ロボットが同行者との同行移動を自律的に行う様子をシミュレーションした結果の例を示す。経路に対するロボットと同行者の移動軌跡を表している。



(a) 初期状態 (b) 移動軌跡

図3 動的環境下における同行移動

② 手つなぎポテンシャルによる同行者との位置関係の制御

並走・縦走の切替えを柔軟に行うために、手つなぎポテンシャル（引力）の概念を考案した。デフォルト状態では、同行者の左右に引力を持った手を設定する。この手つなぎポテンシャルにより、通常状態では並走状態に落ち着く。対向者には進行方向に強い斥力を持たせ（対向者の歩行速度の大きさにより、斥力ポテンシャルの大きさを調整する）、対向者が近付くと、同行者、ロボット、対向者の位置関係や速度、周囲の障害物の位置に基づき、ロボットが同行者の前に行くか後ろに行くかの判断に基づき、同行者の手つなぎ用の手は同行者の前或いは後ろに移動する。この手の引力に引かれて、ロボットは同行者の前或いは後ろに移動し、並走から縦走への切替えが自律的に行われる。シミュレーションによって、対向歩行者が接近する前に当該歩行者が通行可能な空間を用意し、接近時には並走・縦走の切替えによって衝突回避が可能であることを確認した。また、静止障害物に対する回避動作と比較した時に、十分な余裕を持って回避が行われていることを確認した。

③ 影ポテンシャル場法による同行者との位置関係の制御

動的障害物は太陽として定義され、太陽は、

進行方向に位置する人物(ロボットの同行者)の背後に影を作る。太陽からの光の到達距離を予め決めておくことにより、動的障害物による影響が及ぶ範囲を限定できる。ロボットは、太陽によって同行者の周囲にできる影領域に向かって動くように制御される。これにより、動的障害物との衝突を安全に避けることが可能となる。複数人のグループに対しては、複数人に外接する仮想的なマクロな太陽を設定する。シミュレーションにより、本方法の有用性を明らかにした。

④ 移動型テレプレゼンスロボット

対向歩行者に対しては、進行方向に伸びるような形状の斥力場を設定する。同行対象者に対しては、距離と角度に応じて、人物に近づき過ぎて衝突しない様にするための斥力場と人物の前方位置を維持するための引力場を設定する。図4(a)~(d)に同行対象者に対してロボットが同行移動している状態で正面から歩行者が歩いてくるという想定で行ったシミュレーションの結果を示す。黒色の部分ではポテンシャルが低く、白色の部分ではポテンシャルが高い。白線で囲まれた丸が同行対象者、ロボット、歩行者を表す。また、同行対象者、ロボット、歩行者には過去の経路を示す線を描画している。前方からの歩行者との衝突を回避しながら、ロボットが同行歩行者との位置関係を自律的に調整(同行歩行者の左側から右側へ)していることが分かる。

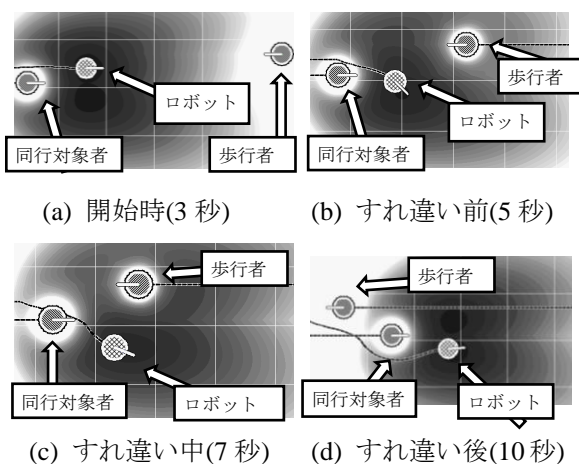


図4 移動型テレプレゼンスロボットの移動

⑤ 案内ロボット

複数の要因(ゴール、被案内者グループ、障害物)の影響を統合することによって、ロボットは自分の動きを調整し、被案内者グループとの相対距離を維持しながら目的地まで案内をする。被案内者には、立ち止まりを許す

などできる限り行動の自由を与える。ロボットは被案内者に対する案内モードと追従モードとを状況に応じて自律的に切替え、より思いやりのある印象を与えるような案内サービスを提供する。実機実験により本手法の有用性を検証した。図5に被案内者が後方に移動した場合でも、案内ロボットが被案内者の行動を優先している状況の例を示す。

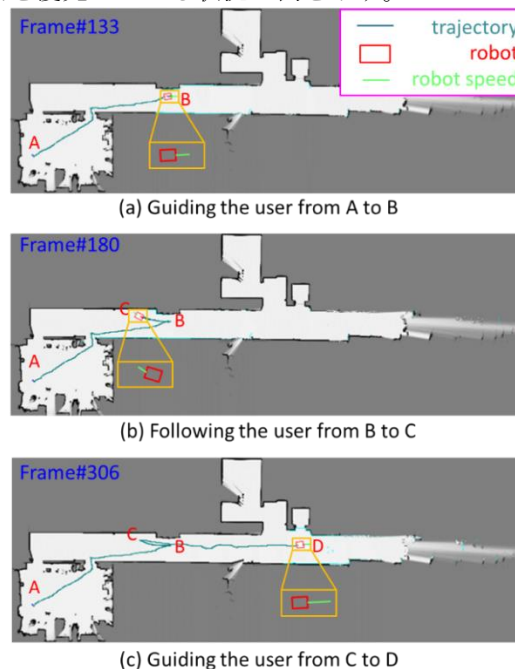


図5 被案内者の行動を優先した案内ロボットの移動軌跡(被案内者が後方に移動)

5. 主な発表論文等

- [雑誌論文] (計3件)
- ① 黒坂翼、金子正秀：“センサの死角を考慮して安全な速度制御と最適移動経路の選択を行う自律移動ロボット,” 電気学会論文誌C, vol.135, no.4, pp.356-364, 2015.4. (査読有)
 - ② 伊藤明久、高橋桂太、金子正秀：“移動ロボットにおける不動領域グリッドマップを用いた潜在的な動物体に頑健な地図生成,” 電気学会論文誌C, vol.134, no.2, pp.192-204, 2014.2. (査読有)
 - ③ 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. (査読有)

[学会発表] (計31件)

- ① 黒坂翼、中村友昭、金子正秀：“動的障害物の移動量の曖昧性を考慮した時空間RRTによる自律移動ロボットの経路生成,” 映像情報メディア学会技術報告, メ

- ディア工学研究会, ME2016-13, 2016.2.20. 関東学院大学 (神奈川県横浜市)
- ② 綿貫貴文、中村友昭、金子正秀：“動的環境下において同伴者との位置関係を調節しながら同行を維持する自律移動ロボット,” 映像情報メディア学会技術報告, メディア工学研究会, ME2016-14, 2016.2.20. 関東学院大学 (神奈川県横浜市)
- ③ 張斌、中村友昭、阿部香澄、アッタミミムハンマド、潮木玲奈、長井隆行、大森隆司、岡夏樹、金子正秀：“保育支援システムのための Kinect を用いた子どもの行動追跡,” SSI2015 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015, GS13-5, 2015.11.20. 函館アリーナ (北海道函館市)
- ④ Bin Zhang, Tomoaki Nakamura, and Masahide Kaneko：“A considerate guidance framework of servicing a users' group for autonomous guiding robot,” 電子情報通信学会技術報告, クラウドネットワークロボット研究会, CNR2015-15, 2015.10.3. やまと会議室 (奈良県奈良市)
- ⑤ Bin Zhang, Tomoaki Nakamura and Masahide Kaneko：“Adaptive fusion of multi-information based human identification for autonomous mobile robot,” The 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, TuIS, IS02, Sept. 1, 2015. Kobe International Conference Center (兵庫県神戸市)
- ⑥ Bin Zhang, Tomoaki Nakamura, and Masahide Kaneko：“Tracking method of multiple users group in a crowd for autonomous guiding robot,” 情報処理学会第 77 回全国大会, 4C-03, 2015.3.18. 京都大学 (京都府京都市)
- ⑦ Bin Zhang, Tomoaki Nakamura, and Masahide Kaneko：“Robust recognition of multiple particular users' group for autonomous guiding robot,” 電子情報通信学会 2015 年総合大会, D-12-69, 2015.3.11. 立命館大学 (滋賀県草津市)
- ⑧ 宮崎斉、中村友昭、金子正秀：“台詞に含まれる感情表現を反映したロボット動作の自動生成,” 映像情報メディア学会技術報告, メディア工学研究会, ME2015-46, 2015.2.28. 関東学院大学 (神奈川県横浜市)
- ⑨ 宮崎斉、中村友昭、金子正秀：“台詞から想起される感情を表現するロボット動作の作成,” 2014 年映像情報メディア学会冬季大会, 6-5, 2014.12.18. 東京理科大学 (東京都新宿区)
- ⑩ Bin Zhang, Tomoaki Nakamura and Masahide Kaneko：“Robust tracking of multiple particular users for group guiding robot,” 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, 3I3-03, 2014.9.6. 九州産業大学 (福岡県福岡市)
- ⑪ 黒坂翼、金子正秀：“センサの死角を考慮して安全な移動経路選択を行う自律移動ロボット,” 情報処理学会第 76 回全国大会, 1ZB-5, pp. 4-177~4-178, 2014.3.11. 東京電機大学 (東京都足立区)
- ⑫ 綿貫貴文、金子正秀：“自律移動ロボットにおける手つなぎポテンシャルを用いた並走・縦走制御,” 情報処理学会第 76 回全国大会, 1ZB-4, pp. 4-175~4-176, 2014.3.11. 東京電機大学 (東京都足立区)
- ⑬ 黒坂翼、金子正秀：“センサの死角を考慮した安全な速度制御によって最適移動経路選択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, ME2014-38, 2014.2.22. 関東学院大学 (神奈川県横浜市)
- ⑭ 綿貫貴文、金子正秀：“人に同行する自律移動ロボットにおける手つなぎポテンシャルを用いた移動制御,” 映像情報メディア学会技術報告, メディア工学研究会, ME2014-37, 2014.2.22. 関東学院大学 (神奈川県横浜市)
- ⑮ Bin Zhang and Masahide Kaneko：“Efficient human-robot interaction for searching unknown user under complex environment with multiple people and objects,” 生命ソフトウェアシンポジウム 2013, G3-2, 2013.10.26. 千葉工業大学 (千葉県習志野市)
- ⑯ Bin Zhang and Masahide Kaneko：“Efficient search for receiver based on audiovisual information under complex environment - toward an intelligent delivery robot-,” 2013 年映像情報メディア学会年次大会, 2-6, 2013.8.28. 工学院大学 (東京都新宿区)
- ⑰ 張斌、高橋桂太、金子正秀：“効率的なインタラクションによる複雑環境下でのユーザ探索,” ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-P15, 2013.5.24. つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
- [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