

# Pebbles: 自律ロボットの移動経路をデザインする タンジブルデバイス

石井 健太郎 米 海鵬 馬 雷 Natsuda Laokulrat

稲見 昌彦 五十嵐 健夫

本論文では、専門知識を持たないユーザが、ロボットが目的地まで移動するための経路をデザインする手法を提案する。ユーザは Pebbles と呼ぶタンジブルデバイスを環境内に設置することによって、ロボットが移動すべき経路を構築することができる。各デバイスは、赤外線通信機構を備えており、各 Pebbles から見えている Pebbles の情報を交換しあうことによって、ネットワークのトポロジを把握する。ロボットはトポロジ情報を用いて移動を計画し、デバイスからの信号を頼りに経由地の方向を知ることができる。設置の際に、見通しがとれていることを保証するために、LED と音声を用いたユーザへのフィードバックを備えており、これにより専門知識を持たないユーザでも正しい場所にデバイスを設置することができる。また、ロボットが移動する目的地には、タンジブルデバイスを置くこととなるため、その場所を示す名前とロボットが理解するデバイスの ID を対応付けることが容易で、ユーザが場所を指定する際に自然な名前に基づいて指定することを可能にしている。ユーザスタディを行い、用意したフィードバックが専門知識を持たない実験参加者をサポートすることにおおむね役立ち、ロボットが移動できるようデバイスの設置を行うことができることを示した。また、実験参加者から得られたコメントをもとに議論を行う。

This study proposes tangible devices that assist non-expert users to design specific navigation routes for mobile robots. The user places the devices, called pebbles, on the floor along the paths to the places where the user wants the robot to move. With infrared communications, pebbles know their network topology by exchanging information about visible neighbors, and the robot then plans a navigation path and moves along the devices in the path. During the deployment, the system provides LED and voice feedback for the user to know if devices are appropriately connected without expert knowledge. In addition, because there is a device at each goal location, our method supports to name locations by associating a device ID with a particular name. Our user study showed that the system feedback largely worked to help non-expert users to design robot navigation. We also discuss observations and participants' comments of the user study.

## 1 はじめに

家庭やオフィスに自律移動可能なロボットが導入されることによって、利便性を得ることが期待できる。例えば、カメラを搭載したロボットを特定の場所に送り、その場所の画像を取得することや、飲食物を他の人に届けるといったことが可能となる。しかし、このようなロボットに、目的の場所やその場所に到達するまでの経路を登録するのは簡単なことではない。一方、家庭やオフィスのエンドユーザが特定の場所を指定する際には、その場所の名前を選んで指定するといったシンプルな操作で、目的の場所を指定することが求められる。本論文では、上記の目的地・経路の登

---

Pebbles: Tangible Devices for Designing Robot Navigation Routes.

Kentaro Ishii, Haipeng Mi, Lei Ma, Natsuda Laokulrat, Takeo Igarashi, 東京大学, The University of Tokyo.

Masahiko Inami, 慶應義塾大学, Keio University.

All Authors, JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト, JST, ERATO, IGARASHI Design Interface Project.

コンピュータソフトウェア, Vol.30, No.3 (2013), pp.76-85.

[研究論文] 2013 年 1 月 8 日受付。

本論文は、第 20 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップの発表論文をもとに発展させたものである。

録と利用時の目的地の指定を、ともにシンプルに行う手法を扱う。

ロボットが目的地までの経路を知るために環境情報を取得する方法にはいくつかの分類が考えられるが、本研究ではロボットが自動で取得する方法と環境に移動経路や位置計測のための装置を配置する方法の2つに分けて考える。ロボットが自動で環境情報を取得する方法は、SLAMに代表される自動で地図を構築する手法[6]を用いる方法である。ロボットは搭載されているセンサに基づき環境内を移動することで、移動可能な領域を取得する。この方法は、ユーザの手間はかからないが、できあがった地図の表現は典型的にはロボットが移動可能な2次元の座標集合であり、ユーザにとって自然な場所の指定方法である「キッチン」といった場所の名前との対応関係の登録は別途行わなければならない。本論文では、この場所と名前の対応付けのことをラベリングと呼ぶ。また、地図構築の際にロボットは探索的に環境内を移動するため、ユーザが望まない領域にもロボットが侵入する可能性がある。

一方、環境に移動経路や位置計測のための装置を配置する方法には、ルールやライントレース用の線といった物理的なガイドを設置する手法・ロボットの位置を外部から計測できる装置やロボットが自己位置を計測するための識別タグを環境に設置する手法が考えられる。物理的なガイドを設置する手法は、環境全体の地図は必要とせず、ガイドの示す経路を局所的に辿ることで、ロボットは目的地まで到達することができる。外部からの計測装置や自己位置計測のための識別タグを設置する手法は、別途環境全体の地図が必要であり、計測装置の設置者が手動で入力する場合が多い。これらの手法は、装置の設置と同時に、設置者が場所の経路や座標と名前との対応関係を登録することができる。ラベリングに手動で対応することができる。しかし、これらの計測装置の設置には、専門的な知識が必要であり、家庭やオフィスのユーザが容易に行えるものではない。また、部屋のレイアウト変更によってロボットが移動可能な領域が変化した際には、再度の専門家による設置・登録作業が必要となる。

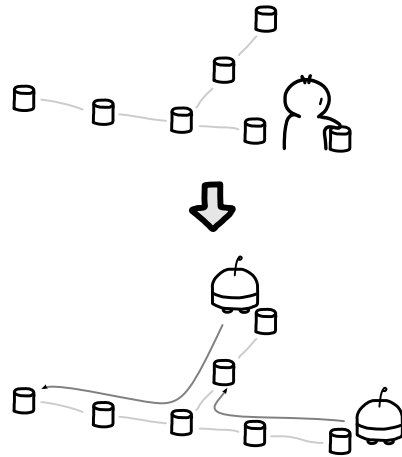


図1 Pebbles 利用イメージ

本論文では、Pebbles と呼ぶ<sup>†1</sup>タンジブルデバイスに環境に置き、Pebbles から送出される信号を頼りにロボットを移動させる手法を提案する(図1)。Pebbles 同士は互いに赤外線<sup>†2</sup>で通信を行い、直進性の高い赤外線信号が届くことはデバイス間の見通しがとれていることを意味し、ロボットが移動できる空間があると見込むことができる。提案手法では、Pebbles を置いてある場所を目的地としてロボットを移動させることができ、ユーザはロボットを移動させたい場所とそこに到達するまでの経路にデバイスを設置する。この際、ロボットが移動する目的地には必ず Pebbles を置くため、装置の ID とその場所の名前を対応付けるラベルを用意することで、自然にラベリングを行うことができる。具体的には、ユーザは目的地の名前を記したラベルを、ロボットに付属する場所指定の数字のボタンに貼ることで、配置した Pebbles の ID に名前を対応付けることができる(後述の図5)。ユーザがロボットに場所を指示するときには、設置の際に付与したラベルを参考にして数字のボタンを押すことができ、場所の名前さえわかれば目的地をロボットに伝えることができる。また、ロボットは Pebbles に沿って移動するため、ユーザが望まない領域にロボットが侵

<sup>†1</sup> 小石 (pebble) に見立てて名付けた。また、1つのデバイスは pebble、複数のデバイスは pebbles と呼ぶのが本来の英語語法ではあるが、日本語で執筆する本論文では統一的に Pebbles と呼ぶ。

入することを明示的に避けることができる。さらに、ユーザの設置作業は、隣接する装置の信号が届く位置に Pebbles を並べるだけであり、隣接確認は Pebbles の LED・ロボットの音声によって行われるため、専門的な知識を必要としない。また、ロボットが移動可能な領域が変化した際も、該当箇所のみ Pebbles を置き直すことによって、再度の設置作業は完了する。

本論文の貢献は、自動的なトポロジ構築・経路探索の技術ではなく、多くのユーザに実行可能な環境構築手法を示すことと、そのユーザのわずかな作業によってロボットが任意の目的地まで自律移動可能になることを示すことにある。

## 2 関連研究

屋内の位置を計測する技術には、様々なものが提案されており、すでに販売されているものも存在する [12]。よく用いられる手法として、電波の信号強度の組から位置を割り出す手法が挙げられる [1]。無線 LAN が普及したことによりインフラはあらためて構築しなくてもよく [4]、無線 LAN の電波に加えて誰でも利用できるラジオ放送用の FM 信号を利用して精度を高めているものもある [2]。その他、外部から特定の機器の位置を計測する手法 [9] や、環境に自己位置を計測するための識別タグを設置する手法 [11] が挙げられる。これらの手法を用いれば、ロボットの自己位置を計測することもできると考えられる。しかし、ロボットが自律移動するためには、自己位置の認識だけではなく、どの経路を通れば目的地にたどり着くかという知識が必要となる。

一方、直進性の高いビーコン信号を送出する装置を配置することにより、大域的な位置はわからなくとも、装置間の相対的な位置関係を知ることができる。また、信号が届くかどうかということによって、環境の構造を知ることができる。そのようなビーコン装置をロボットが環境を知るために用いる提案が過去になされている。ただし、いずれもロボットが装置を配置する [7]・ロボット自体がビーコンの機能をはたす [10] というものであり、家庭やオフィスのユーザが設置可能だという議論はなされていない。

ロボットの自己位置と活動する環境を同時に取得

する手法である SLAM が広く研究されている。環境を計測する手段としては、超音波 [6]・レーザ [8]・カメラ画像 [3] のように多様なものがある。この手法は、ロボットが環境内を動きまわることによって地図を構成する。地図構成後は、ロボットが地図上のどこにいるかを認識することができ、ある目的地まで移動経路を計画するといったことも可能である。しかし、典型的には地図の内部表現は座標集合であり、専門知識を持たないユーザが場所を指定するためには、適切な中間表現を生成する必要がある。

提案手法は、ロボットが自律移動で用いる内部表現を積極的に物理的なデバイスに反映しようとするものであり、タンジブルビッツ [5] の考えを参考としている。タンジブルであることが、ユーザが実世界上の場所をシステムに伝えるシンプルな手段を提供し、その結果、専門知識を持たなくとも利用できるという提案手法の特徴を生み出している。

## 3 Pebbles

### 3.1 デバイスハードウェア

Pebbles は、24 個の赤外線送信機と 8 個の赤外線受信機を備えている (図 2 左)。24 個の赤外線送信機は全周囲をカバーするように配置され、赤外線信号は一斉に送信される。8 個の赤外線受信機も同様に全周囲をカバーするように配置され、全方位からの赤外線を受信する。赤外線通信は 5m までの距離ならば、安定して行うことができる。Pebbles の上部には、ボタンと LED が配置されている (図 2 右)。ボタンによりユーザの入力を受け付けることができ、LED によりユーザへのプリミティブなフィードバックを提示することができる。



図 2 Pebbles のハードウェア

### 3.2 Pebbles の設置

ロボットは、Pebbles の隣接情報を基に経路を計画し、Pebbles から送信される赤外線信号を頼りに移動する。そのため、各 Pebbles は、必ず 1 つ以上の他の Pebbles と通信を行える状態で孤立することがないように設置される必要がある。Pebbles 同士の見通しがとれるように設置するのはユーザーに任された作業であり、本システムはユーザーが隣接関係を確認するために、LED フィードバックと音声フィードバックを備えている。

LED フィードバックは、Pebbles に備え付けられた LED により隣接関係を示すもので、信号を送信または受信したタイミングで、対応する方向の LED を短く 2 度点滅させる (図 3)。これにより、信号を送信した Pebbles とその信号を受信した Pebbles は同期して点滅するため、信号が届いているかの確認を行うことができる。音声フィードバックは、ロボットに搭載しているスピーカから、“I can locate #3, #2, and #5.” といった到達可能な Pebbles の ID を列挙することによって行われる。ユーザーは、期待通りに Pebbles が観測されているかを確認することができ、期待とは異なる場合、どの Pebbles との通信が行われていないかを知ることができる。ロボットがどの Pebbles から信号を受信できない場合には、“I cannot see any pebble.” と発声し、ユーザーに Pebbles の再設置を促す。

ユーザーは、以上のフィードバックをもとに Pebbles が通信を行っていることを確認しながら、ロボットの利用を始める前に、ロボットを移動させたい場所とその場所に到達するまでの経路に Pebbles を配置する必要がある。例えば、図 4 のように配置した場合には、上中央の部屋を除いたすべての部屋にロボットを移動させることができる。この場合、上中央の部屋にロボットが侵入することを、明示的に避けることができる。

環境のレイアウト変更や移動経路にものが置かれるといったことのために、移動経路を変更する必要がある場合には、ユーザーは該当する Pebbles を置き直す必要がある。Pebbles は一定間隔で信号の送信を繰り返しており、置き直しによるトポロジの変化を自動

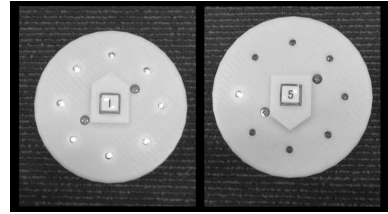


図 3 LED フィードバック: 送信側 Pebbles と受信側 Pebbles は同期して LED を点滅させる。送信側 Pebbles(左図) はすべての方向に信号を送出するためすべての LED を点滅させ、受信側 Pebbles(右図) は信号を受信した受信機に対応する LED のみを点滅させる。

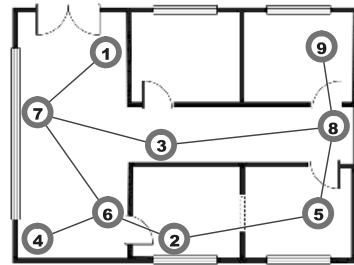


図 4 Pebbles 設置の例

的に検出してネットワーク情報を更新する。このため、移動経路を変える場合の再設置は、初期設置と同様に各 Pebbles が他の Pebbles と通信を行えることを確認しながら置き直すだけでよい。

目的地のラベリングは、ロボットに付属する場所指定ボタンに名前を書いたラベルを貼ることによって行われる (図 5)。家庭やオフィスにおいて目的地に対して行われるラベリングには、固定・半固定・動的の 3 種類があると考えられる。固定の目的地とは、「キッチン」・「玄関/入口」・「ミーティングルーム」といった、1 度設定してしまえばその名前に対応する場所が変化しない目的地のことである。半固定の目的地とは、「ダイニングテーブル」・「ソファ」・「○○さんのデスク」といった、基本的には固定だが、レイアウト変更などによって、設定後その名前に対応する場所が変化する可能性のある目的地のことである。動的な目的地とは、「お父さん」・「○○さん」といった常に移動するユーザーに対して与えられる目的地で、ユーザーはそれぞれの活動において場所を移動することがあるが、



図5 ラベルの貼り付けによる目的地のラベリング

その際に自分がラベリングされた Pebbles を持ち歩き、そばに置いておくことによって、ロボットはユーザの現在の場所を知ることができる。この場合、例えば他のユーザが荷物を届けたいといった場合に、荷物を送るユーザは届け先のユーザが現在どこにいるかを知る必要もなく、対象ユーザを指定するだけでよい。Pebbles はいずれのシナリオにおいても同様の方法で目的地の設定とラベリングを行うことができ、特に、半固定・動的の目的地の利用に関して、あとからユーザ自身の手で設定し直せるという点で、既存手法よりも優れていると言える。

### 3.3 目的地の指定

ロボットに目的地を指定する基本的な方法は、ロボットに付属する場所指定ボタンを押すことである(図6左)。ロボットのアプリケーションサービスは、必要に応じてユーザに目的地の入力を求め、サービスを遂行する。また、遠くにいるロボットを呼び寄せたり、作業を行う場所を巡回しながら知らせたりするために、Pebbles のボタンが押されたことをロボットに伝達する機能も実現している(図6右)。この場合、ユーザへのフィードバックとして、3.2節で示した信号送受信を知らせる点滅よりも長い周期で、すべてのLEDが点滅し続ける。ロボットによって作業が完了するか、もう1度ユーザがボタンを押すことによって、ボタンが押された状態は終了して元に戻る。

### 3.4 ロボットナビゲーション

ロボットは、Pebbles からの赤外線信号を頼りに目的地まで移動する。そのため、ロボットには床に配置された Pebbles の赤外線を受信するための Pebbles

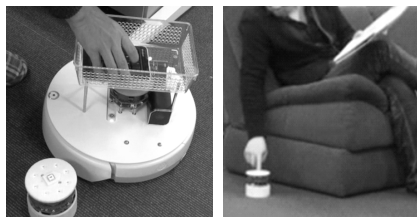


図6 目的地を指定する2つの方法

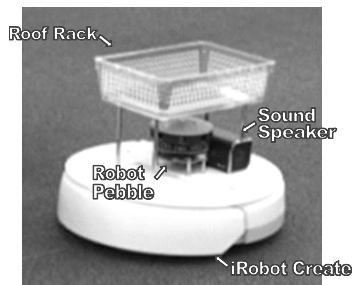


図7 ロボットプラットフォーム

が1つ搭載されている(図7)。ロボットには iRobot Create を用い、他に音声フィードバックのためのスピーカと物体を運搬するためのかごが備え付けられている(図7)。

Pebbles 同士が近づくと、8方向の赤外線受信機のうち、より多くの受信機が信号を受信ようになる。この性質を利用して、ロボットに搭載されている Pebbles の受信チャンネル数を監視することにより、ロボットは現在向かっている Pebbles までの距離を推定することができる。また、ロボットには衝突検知のバンパーを備えており、Pebbles を含む物体に衝突した場合には一時的に進路を変えて目的の Pebbles への移動を続ける。このように、ロボットは Pebbles を避けるように移動するため、ある Pebbles に到達した場合に、その Pebbles からは次の Pebbles が見えていないがロボットからは次の Pebbles が見えていないということが起こりうる。この問題によりナビゲーションが失敗してしまうことを防ぐため、ナビゲーションの途中で目的の Pebbles がみつからない場合には、周辺をランダムに移動する動作を実装している。ランダム移動動作で目的の Pebbles がみつかった場合には、その位置からナビゲーションを再開し、

ランダム移動動作でも目的の Pebbles がみつからない場合には、“Can you help me? I’m lost.”と発声してナビゲーションを中止する。

光沢のある壁の隅など、反射の強い素材に囲まれてしまうと、いずれの方向からも信号が届き、ロボットがどちらに進んでよいかわからなくなることが起こりうる。これは、提案手法によるナビゲーションの原理的な制限である。プロトタイプシステムでは、ロボットがしばらく同じ場所にとどまっていた場合は、信号が全周囲から届かなくなるまで周辺をランダムに移動する動作を実装している。

## 4 ユーザスタディ

### 4.1 目的と実験手順

Pebbles が初心者にも簡単に設置できることを確かめるためのユーザスタディを行う。ユーザスタディは大きく分けて2つの実験からなる。1つ目の実験(以後、実験1と呼ぶ。)は、システムの理解のしやすさを調査するために行い、実験参加者に利用方法が書かれたユーザマニュアルのみを渡して、与えられた課題を完了できるかをテストする。実験1は、1つの部屋とその部屋に通じる通路からなる環境で行い、ロボットを移動させる目的地同士は見通しがとれておらず、部屋の中にロボットを移動させるには適切な経路地を必要とするように設定する(図8(a))。実験1のあと、実験者は実験参加者にシステムの使いかたを提示し、実験参加者の理解が正しかったかを確認する。また、実験参加者からの質問も受け付け、疑問点を明らかにする。2つ目の実験(以後、実験2と呼ぶ。)は、より複雑な環境で移動経路をデザインできるかを調査するために行い、4つの場所とそれらを結ぶ通路からなる環境で行う(図8(b))。

各実験において、実験参加者の思考を観察するため、実験参加者は自分が何を考えているかを口に出すように指示される。また、実験者はロボットを環境内に配置し、実装済みの9つのPebblesを電源の入っていない状態で実験参加者に手渡す。

実験1においては、実験参加者はまずユーザマニュアルを受けとり、読むように指示される。実験参加者がユーザマニュアルを十分に読んだ段階で、目的地同

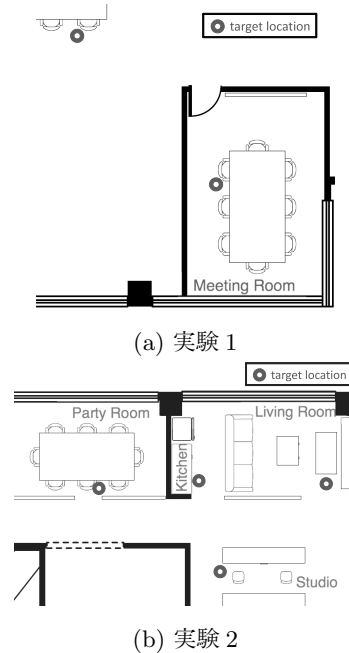


図8 実験環境

士を結ぶロボットの経路を設定するように指示され、Pebblesを設置する。このとき、設置をサポートするLEDフィードバック・音声フィードバックについては、ユーザマニュアルに記載があるが、これらを利用することは特に指示していない。設置が完了したら、実験参加者はロボットを2つの目的地に2つの方法で移動させることを指示され、それを行う。このとき、ロボットの移動がうまくいかない場合は、Pebblesの設置を修正することを許可している。実験参加者がどうしてもシステムを理解できずロボットの移動を完了できない場合には、実験参加者は正しくシステムを理解できなかったものとし、その段階で実験者がシステムに関する説明を行う。

実験2においては、各目的地にロボットが到達できるようにPebblesを設置するように指示される。設置が完了したら、各目的地に到達できるよう正しく設置がなされているかを、実験者が音声フィードバックにより確かめる。その後、例えば「キッチンにいるお母さんがリビングにいるお父さんにお菓子とコーヒーを届けたい」といったシナリオとタスクを実験参加者に与え、そのタスクに沿ってロボットを移動させ

ること指示する。このときも、ロボットの移動がうまくいかない場合は、Pebbles の設置を修正することを許可している。また、どうしてもロボットの移動を完了できない場合には、実験者が原因を調べて実験参加者に伝える。

実験 2 が終了したら、本システムに関する聞き取り調査を行う。

## 4.2 実験結果

8 名の実験参加者を招いて実験を行った。いずれも事前に提案システムについて知ってはならず、ロボット・電子回路・赤外線通信について専門的な知識は持っていない。年齢は 26 歳から 62 歳 (平均 35.6 歳) であった。

### 4.2.1 実験 1

8 名中 6 名の実験参加者がシステムの利用方法を正しく理解し、2 つの目的地までロボットを移動させることができた。正しく理解できなかった実験参加者のうち 1 名は、Pebbles がネットワークを構築してロボットを誘導するというコンセプトを理解しておらず、経路地に 1 つの Pebbles を設置してロボットを移動させ、移動が完了すると設置した Pebbles を次の経路地まで持って行きロボットを移動させるということを繰り返した。もう 1 名は、目的地への経路に沿って Pebbles を設置したが、隣接する Pebbles との見通しがとれていないといけないことを理解しておらず、部屋の入口から中への経路が途絶えており、ロボットは移動することができなかった。

また、実験参加者の行動・発言の中に、興味深いものが観察された。1 名の実験参加者は、システムに関する説明をする前であったにも関わらず、1 つの Pebbles を持ち歩き、Pebbles のボタンを押してロボットを自分の場所へ移動させようとした。ただし、Pebbles を机の上に置いてボタンを押したため、ロボットが通れる見通しを確保するために直進性の高い赤外線通信を用いた現在の実装では、床に配置した Pebbles との通信が行われず、ロボットを移動させることができなかった。他の 1 名の実験参加者は、部屋の隅や椅子の下といった目立たない場所に Pebbles を置き、ユーザ自身の活動を邪魔しないようにこのよ

うな置きかたにしたという趣旨の発言をした。

### 4.2.2 実験 2

8 名全員が 4 つの目的地に到達できるような経路ネットワークを構築することができた。設置の際には、すべての実験参加者が、音声フィードバックを利用して目的地に設置した Pebbles がネットワークに加えられたかを確認した。設置後の移動の指示の際には、8 名全体で 21 回のロボットの移動を行った。21 回中 17 回の移動では、問題なくロボットは目的地に到達することができた。残りの 4 回の移動では、ロボットが途中でターゲットとしている Pebbles を見失い、ユーザに助けを求めるといったことがあった。いずれの場合も、Pebbles を設置し直し、再度移動の指示を行うことによって、ロボットは目的地まで到達した。

実験参加者の行動・発言の観察から、実験 1 に比べて複雑な環境においても、設置の作業は同様に行うことができ、環境の複雑さに比例する難しさは感じていないようであった。なるべく効率的な移動ができるような経路ネットワークを構築するために、何度も設置をし直しネットワークの状況を確認する実験参加者の傾向が確認された。また、1 名の実験参加者は、実験では指示しなかった部屋にも Pebbles を設置した。このことは、設置やその後の修正を容易に行うことができるという本論文の主張を支持するものであると考える。

### 4.2.3 聞き取り調査と考察

デバイスの設置をサポートしてロボットの移動経路のデザインを助けるユーザへのフィードバックに関して、おおむね良好な評価が得られた。ただし、実験参加者は LED フィードバックよりも音声フィードバックを好んでいた。特に、1 名の実験参加者は LED フィードバックをまったく確認せず、音声フィードバックのみを利用して設置が正しいことを確認したと述べた。LED フィードバックに関しては、改善の余地があると考えられ、今後取り組んでいく予定である。

全体のシステム利用に関して、2 名の実験参加者が否定的な意見を述べた。そのうちの 1 名は「長期的に使うには、メンテナンスにかかる手間が多すぎるの

ではないか。」と述べた。本実験では、このことを検証できていないが、現状の実装では、Pebblesは電池で動作しており、電池の交換を必要とする。持ち歩くものを除けば、Pebblesは部屋の要所に半固定的に設置するものである。コンセントから電源を供給できるようにするといったことが改善案として考えられる。また、もう1名は「うまくつながるネットワークを構築するためにどこに置くかをあまり考えたくない。」と述べた。しかし、これに関しては、我々はユーザが負うべき作業であると考え、ユーザ自身が移動経路をデザインし、ユーザが望まない領域にロボットが侵入することを避けるのが提案デバイスの狙いであることと、ロボットには容易ではない「どこを経路とすればよいか」をユーザは容易に把握できることが、主な理由である。ユーザによる設置が完了すれば、ロボットの動作自体は自律的に行われ、ユーザはロボットによるサービスを楽しむことができる。

多くの実験参加者が「Pebblesはもっと目立たなくできたらよい。」と述べ、現在の実装より小さなサイズが求められていることが明らかになった。現在の実装の通信可能な距離である5mは、想定される利用環境では必要以上の距離であると考えられ、より小さく実現することを考えている。最終的には、壁や家具の足に取り付けられる大きさのデバイスを実現することができれば、ユーザの要求を満たすことができると考えている。

環境に物理的にデバイスを配置しなければならないことは、提案手法の本質的な制限である。提案手法が解決する課題である移動経路のデザインと目的地のラベリングを、デバイスを配置することなく解決する手法として、SLAMにより地図を構築した環境において、地図上の目的地を指定して名前をデータとしてシステムに記憶させるといった手法が考えられる。しかし、このSLAMによる手法は、目的地の指定や地図が構築できているかの確認のために、現実世界と2次元画像の地図を比較する必要があり、より専門性の高いシステム状態の理解が必要であると考え、デバイスを置く必要があるが容易に状態を確認できることを好むか、状態の確認は専門的であるがデバイスを置く必要がないことを好むかは、ユーザによって分

かれるところであると考えており、提案手法は前者のユーザをサポートする。また、SLAMによる手法では、自己位置計測はセンサを搭載するロボットのインクリメンタルな作業であり、任意の移動する物体が現在地図上のどこにあるかを知ることはできないため、3.2節で示した動的目的地のラベリングは実現することができない。

1名の実験参加者は、「携帯電話でロボットを呼ぶことができたらい。」と述べた。このことは、自分の周辺にPebblesがある限り、携帯電話でそのPebblesを目的地に指定することで実現可能である。3.2節で示した通り、動的目的地として自分用のPebblesを持ち歩くようになれば、好きな場所にロボットを呼び寄せることが可能である。また、携帯電話に赤外線通信機構が備わっていて、ロボットを呼びたい場合にはPebblesとして機能することも、実現可能な方策である。

## 5 まとめ

本論文では、ロボットが目的地までの経路を知るために用いる、互いに赤外線通信して経路ネットワークを自動構築するタンジブルデバイスPebblesを提案した。Pebblesは、既存手法において問題であったラベリングの複雑性・ユーザの望まない場所へのロボットの侵入・専門知識の必要性・環境変化の際の手間を回避し、家庭やオフィスのユーザにも装置を設置できるように設計されている。

自律移動ロボットが導入されれば、家庭の生活やオフィスの活動において利便性が向上すると考えられるが、完全に自律的にユーザが意図した通りに動作できるロボットを実現することは難しい。本研究では、ロボットのガイドとなるデバイスを配置するユーザの作業で、ロボットの機能性が向上し、同時にユーザの指示も容易となる手法を示した。ロボットの基本的な機能の向上とともに、ユーザの利便性を向上させる本研究課題も重要なテーマであると考え、

**謝辞** 本研究の初期段階において有益なコメントをいただき、提案デバイスのもととなる旧バージョンの実装に際して協力いただいた石田明彦氏・Greg Saul



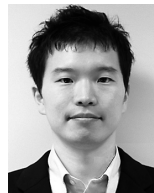
氏に感謝する。また、提案デバイスの実装に際して協力いただいた神山洋一氏に感謝する。また、提案デバイスの動作テストとビデオ撮影に協力いただいた Thien-Anh Tran 氏・ Gary Mialaret 氏に感謝する。

## 参考文献

- [1] Bahl, P. and Padmanabhan, V. N.: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, in *Proceedings of Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Vol. 2, 2000, pp. 775–784.
- [2] Chen, Y., Lymberopoulos, D., Liu, J. and Priyantha, B.: FM-based Indoor Localization, in *Proceedings of International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, 2012, pp. 169–182.
- [3] Davison, A. J. and Murray, D. W.: Mobile Robot Localisation Using Active Vision, in *Proceedings of European Conference on Computer Vision*, Vol. 2, 1998, pp. 809–825.
- [4] Haeberlen, A., Flannery, E., Ladd, A. M., Rudys, A., Wallach, D. S. and Kavraki, L. E.: Practical Robust Localization over Large-Scale 802.11 Wireless Networks, in *Proceedings of Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2004, pp. 70–84.
- [5] Ishii, H. and Ullmer, B.: Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms, in *Proceedings of ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computer Systems*, 1997, pp. 234–241.
- [6] Leonard, J. J. and Durrant-Whyte, H. F.: Simultaneous Map Building and Localization for an Autonomous Mobile Robot, in *Proceedings of IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, 1991, pp. 1442–1447.
- [7] Miyama, S., Imai, M. and Anzai, Y.: Rescue Robot under Disaster Situation: Position Acquisition with Omni-directional Sensor, in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 4, 2003, pp. 3132–3137.
- [8] Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D. and Wegbreit, B.: FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem, in *Proceedings of National Conference on Artificial Intelligence*, 2002, pp. 593–598.
- [9] Nishida, Y., Aizawa, H., Hori, T., Hoffman, N. H., Kanade, T. and Kakikura, M.: 3D Ultrasonic Tagging System for Observing Human Activity, in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, 2003, pp. 785–791.
- [10] Pugh, J. and Martinoli, A.: Relative Localization and Communication Module for Small-Scale Multi-Robot Systems, in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automata-*

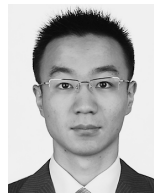
*tion*, 2006, pp. 188–193.

- [11] Saito, S., Hiyama, A., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Indoor Marker-based Localization Using Coded Seamless Pattern for Interior Decoration, in *Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference*, 2007, pp. 67–74.
- [12] Ubisense, <http://www.ubisense.net>.



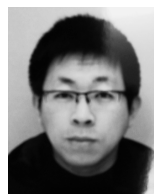
石井健太郎

2003 年慶應義塾大学工学部情報工学科卒業。2005 年同大学大学院工学研究科修士課程修了。2009 年同博士課程所定単位取得退学。博士(工学)。2009 年科学技術振興機構 ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト技術員。2010 年東京大学大学院情報学環助教。ヒューマンロボットインタラクション・ユーザインタフェースの研究に従事。



米海鵬

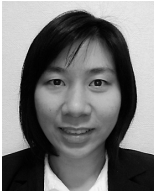
Haipeng Mi is an assistant professor at Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo. He received his B.S., M.S. from Tsinghua University, China in 2005, 2008 respectively, and his Ph.D. from The University of Tokyo in 2011. From 2011 to 2012, he worked for Japan Science and Technology Agency, ERATO, IGARASHI Design Interface Project. His research interest includes human-robot interaction and natural user interfaces.



馬雷

Lei Ma is a Ph.D. student in The University of Tokyo. He received his B.S. from Shanghai Jiao Tong University in the Department of Computer Science in 2009, M.S. from The University of Tokyo in Department of Electrical Engineering and Information System. From 2012, he worked as a research assistant for Japan Science and Technology Agency, ERATO, IGARASHI Design Inter-

face Project. His research interest includes human-robot interaction and user interfaces.



### Natsuda Laokulrat

Natsuda Laokulrat is currently a Ph.D. candidate at the Department of Electrical Engineering and Information Systems, The University of Tokyo. She received her B.Eng. from Chulalongkorn University, Thailand in 2008 and M.Eng. from The University of Tokyo in 2011. In 2012, she worked for Japan Science and Technology Agency, ERATO, IGARASHI Design Interface Project. Her research interest includes human-computer interaction, natural language processing, and machine learning.



### 稲見 昌彦

1999年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。東京大学助手、電気通信大学講師、同大学助教授、同大学教授、JST さきがけ研究者、MIT コンピュータ科学・人工知能研究所客

員科学者などを経て、2008年4月慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科教授。JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクトグループリーダー、日本VR学会理事、情報処理学会EC研究会主査、コンピュータエンタテインメント協会理事を兼任。複合現実感、ロボット工学、エンタテインメント工学等インタラクティブ技術に関する研究に従事。



### 五十嵐健夫

JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト総括。東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻教授。2000年、東京大学大学院においてユーザインタフェースに関する研究により博士号(工学)取得。その後2年間、米ブラウン大学において博士研究員として研究活動に従事し、2002年3月に東京大学大学院情報理工学研究科講師就任、2005年8月同助教授、2011年5月より教授。IBM科学賞、文部省若手科学者賞、ACM SIGGRAPH Significant New Researcher Award, Katayanagi Prize in Computer Science 等受賞。ユーザインタフェース、特に、インタラクティブコンピュータグラフィクスに関する研究に取り組んでいる。