

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330302

研究課題名(和文)空間の最適な再構成における移動モジュールの振る舞いに関する研究

研究課題名(英文)A Research on Optimal Replacement of Mobile Module in Environment

研究代表者

李 周浩 (Lee, Joo-Ho)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：80366434

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、最構成が可能な知能化空間内におけるデバイス配置問題の解明を行った。一般的な空間では空間内のデバイスが固定されており、内部の状況変化に対して最適な配置を保つことができない。しかし、壁や天井面上を移動できるロボットにデバイスを載せて空間内の状況に合わせて最適な位置に移動すれば常に最高のパフォーマンスを保つ知能化空間が実現できる。本研究の成果は大きく分けて三つあげられる。一に、デバイスと対象者間の関係を定式化し、そこから最適な位置や姿勢を求められるようにしたことである。二に、複数のデバイスが最適な位置に移動する際の手法を開発したことである。三に、ロボットの性能を改良したことである。

研究成果の概要(英文)：In this research, we elucidated the optimal device placement problem in the reconfigurable intelligent space. Devices in the space are fixed in general space and it is impossible to maintain the optimal arrangement for the internal situation change. However, if a device is placed on a robot that can move on a wall or a ceiling surface and moved to the optimum position according to the situation in the space, an intelligent space can always be realized that maintains the best performance. The results of this research can be roughly divided into three. First, the relationship between the device and the target person was formulated, and the optimum position and attitude can be obtained therefrom. Secondly, we developed an algorithm for moving multiple devices to the optimum positions. Thirdly, the performance of robot was improved.

研究分野：空間知能化

キーワード：空間知能化 移動モジュール 最適配置

### 1. 研究開始当初の背景

近年、Ambient Intelligence, Pervasive Computing など人間中心デザインによる消費者家電、情報通信技術、コンピューティングが注目されている。本研究者は、古くから人間中心デザインに基づいた新しい空間概念として知能化空間(Intelligent Space)を提案して来た。知能化空間は、センサ、処理機能、通信機能をもつデバイスを空間内に分散配置して、ユーザをモニタリング、支援する空間型システムである。これまで本研究者は知能化空間研究を幅広く行うと同時に多くの国内外の学会で知能化空間のセッションを企画したり、研究会を作ったりするなど知能化空間の発展と普及のために活発な活動を行ってきており、「Intelligent Space - concept and content」(Lee et al. Advanced Robotics 2002)は関連学術論文から最も多く参照された論文の一つとされている。今後、知能化空間が我々の生活空間を変えられると考えられるが、いくつか先決されるべき問題点がある。最適なセンサ配置問題もその一つである。これは知能化空間だけではなくセンサネットワーク分野など、複数のセンサを用いて観測を行う場合に生じる問題で、状況によってセンサの最適な位置などが変化するため、唯一解は存在しないと言われている。そのため、殆どの研究では、ヒューリスティックにセンサの配置を決めるか、可能な限り最善な配置を探すか、研究の対象外とするかの中からいずれか一つの手法を選んでいる。本研究者も早くからこの問題について研究したが可能な限り最善な配置を探すことにとどまった(Lee et al. IEEE/RSJ IROS 2002)。

### 2. 研究の目的

2012年、本研究グループは、空間内の状況に合わせて空間そのものが再構成を行う知能化空間、R+iSpace (Reconfigurable Intelligent Space)を提案した。R+iSpaceでは天井や壁に一定間隔で小さな穴を空け、その穴を用いて移動モジュール(Mobile Module, MoMo)が自由に移動する。この手法で知能化空間を構成し、空間内の状況によってセンサデバイス等を再配置すると以下のようなメリットがある。人の人数、位置、向きなどの現在の状況に合わせて最適なセンサ配置が可能になる。環境側に一定の間隔で空けられた穴を用いてセンサが移動するため移動距離に関係なく計測誤差が一定範囲内に収まる。穴を利用して留まるため静止状態を維持するためのエネルギー消費がない。電力を穴から供給することが可能なためバッテリー、電源ケーブルなどの必要がなくなる。天井や壁で移動するため床の上にいる人間とは活動領域が重ならず、互いに干渉しない。天井や壁に一定間隔で小さな穴を空けるだけなのでレールを敷くなど大掛かりな設備が必要なく、美観を大きく損な

うこともない。MoMoの移動だけではなく穴を用いて様々なものを固定することが可能である。

R+iSpaceとMoMoの提案は国際会議で報告しており、MoMoを利用する空間の再構成技術は特許出願を行った。提案以来、本研究グループはMoMoのプロトタイプ1,2号機を制作し、MoMoの移動性能向上を図った。また、研究室内に実験環境を制作して上記のメリットを確認した。

本研究グループは上述した背景と成果を踏まえて、これまで研究してきた知能化空間の知識と経験をもとに、センサ及びその他のデバイスがMoMoによって再配置され、常に状況に合わせて最適化される知能化空間の実現を目指した。さらに、本研究グループが遂行した科研(23500248, H23-H25)の成果も応用し、R+iSpaceにおける最適なMoMoの振る舞いの解明に挑戦した。

過去の研究成果をもとに、本研究ではMoMoを用いて空間内の限られたリソースをどこに配置するのか、どのような経路で移動させるのかなど、空間の最適な再構成におけるMoMoの振る舞いに関する研究を行った。具体的には研究期間内に以下の項目を学術的に明らかにすることを目的とした。

(1)人を中心とした空間内の状況に基づくセンサを含むデバイスの最適な配置について明らかにする。(人数、デバイス数、デバイス種類などのパラメータも最適配置決めに用いる。)

(2)MoMoの移動経路決定方法を明らかにする。(MoMo単独で移動、複数MoMoが個別の目的をもって移動、複数MoMoが同じデバイスを搭載し連携して移動など状況別経路決定を行う。)

(3)3Dシミュレーションを行って提案手法の検証を行い、その効果及び性能を明らかにする。

(4)シミュレーション・実験結果からMoMoの実用化に向けた必要性能及び改善点を見つけて出す。

### 3. 研究の方法

本研究は、知能化空間が空間内の人や状況を把握して最適なデバイスの配置を行い、その結果に従いMoMoを移動させ、MoMoに載せられたデバイスを再配置することを大きな目標としている。本研究では、MoMoの振る舞いを、空間内の状況に合わせて、また載せられたデバイスに合わせて、MoMoをどこまでどのように動かすかを定める一連の行為全てと定義する。MoMoの振る舞いの解明が本申請における実践的な目標であり、R+iSpaceを実現する上で最重要課題である。MoMoの振る舞いの解明として研究期間内に行う詳細な研究内容は以下の通りである。

(1)人の位置と向きに基づいてデバイスの最適な位置・姿勢を定める。

MoMo に載せるデバイスとそのデバイスとかわる対象との関係性を数理モデルとして表現する。また、各デバイスの性能に合わせて代表数理モデルのパラメータを調整する。数理モデルで表現できたデバイスを、科研（23500248, H23-H25）の成果を活用して空間内のユーザに対する最適な位置と姿勢を採す評価関数を作成する。

(2) MoMo の移動経路、トラフィック制御手法を解明する。

本研究では、MoMo の移動のために天井や壁に一定の間隔で穴を空けて、その穴の中にナットのようなものを入れておく。MoMo は穴にボルトのようなものを入れて締め、胴体の一部を壁に固定しながら移動する。MoMo プロトタイプ 2 号機は天井や壁に MoMo が固定された状態で搭載しているデバイスを移動させ、デバイスが乗っていない半分を壁から取り外し回転させて固定する。以上を繰り返しながら移動する。このような特集な移動法を用いるため MoMo の移動経路の計算は、回転の方向、障害物の位置などを良く考慮して行う必要があり、A\*を基本とする従来の方法では問題が生じることまでは基礎シミュレーションで確認した。R+iSpace を実現するためには同じ平面上に複数の MoMo が存在しなければならない。そのため MoMo の移動特性を考慮した経路計画、トラフィックコントロールが必要である。また、R+iSpace では、テレビなどの重いデバイスの場合、複数の MoMo が同時にデバイスを支えながら連携して移動しなければならない。そのため、より複雑な移動経路計画とトラフィック制御が必要となり、本研究ではそれらを解明する。

(3) 実用的な MoMo の要求事項を明らかにして、MoMo を改善する。

本研究では実際の部屋規模で R+iSpace の実験環境を制作する予定である。A, B の結果を検証するだけでなく、MoMo そのものの問題点と改善点を見つけ出し、MoMo の実用化に向けて必要とされる要求事項を明確にする。また、それに応じて MoMo のハードウェアとソフトウェアを改善する。

#### 4. 研究成果

研究方法で述べた 3 つの研究内容に分けて研究成果を以下に挙げる。

(1) デバイス最適配置のためのモデリング  
空間内に存在するデバイスの最適配置位置を定めるためには各デバイスのモデリングが必要である。本研究では、センサ等のデバイスに対してデバイスごとにモデル化する代わりに、モデル化に必要とされる基本要素を選定し、各要素のパラメータを決めることによりどのようなデバイスも共通の数式でモデリングできるようにした。さらにモデリングされたデバイスの評価値の最大化で最

適配置を実現できることに成功した。その詳細を以下に述べる。空間内に存在するデバイスは対象を観測するセンサデバイスと対象に物理的な影響を与える照明やプロジェクタのような出力デバイスに分けられる。しかし、これらの二種類のデバイスは、対象とデバイス間の空間の関係性のみを考慮すると一意にモデル化できる。本研究では、両者間の関係を、距離、角度、遮蔽、障害物、可能性、移動距離（時間）で表すモデルを提案し、デバイス配置の最適化を試みた。以下に上記の 6 つの条件を定式化したものを示す。

$$EV_1(N) := \begin{cases} 0 & D_N \leq D_m \\ \frac{D_N - D_m}{\alpha_1} & D_m < D_N \leq D_m + \alpha_1 \\ 1 & D_m + \alpha_1 < D_N \leq D_M - \alpha_1 \\ \frac{D_M - D_N}{\alpha_1} & D_M - \alpha_1 < D_N \leq D_M \\ 0 & D_M < D_N \end{cases}$$

$$EV_2(N) = \max_{i \in k} EV_2^i(N)$$

$$EV_2^i(N) := \begin{cases} 1 & IA^i \leq IA_M - \alpha_2 \\ \frac{IA_M - IA^i}{\alpha_2} & IA_M - \alpha_2 < IA^i \leq IA_M \\ 0 & IA_M < IA^i \end{cases}$$

$$EV_3(N) := \begin{cases} 1 & \text{There is no occlusion.} \\ 0 & \text{There is an occlusion.} \end{cases}$$

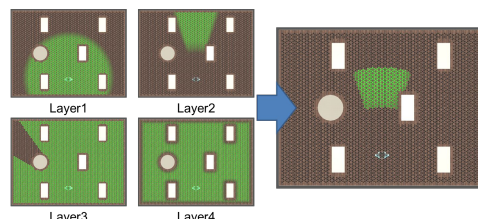
$$EV_4(N) := \begin{cases} 0 & D(N) \leq \sigma D_m \\ \frac{D(N) - \sigma D_m}{\alpha_4} & \sigma D_m < D(N) \leq \sigma D_m + \alpha_4 \\ 1 & \sigma D_m + \alpha_4 < D(N) \end{cases}$$

$$EV_5(N) := \begin{cases} \sum_{i=0}^2 \omega_5^i \cdot \overline{EV_{int}(iN_{Adj})} & \text{If } EV_{int}(N) \neq 0 \\ 0 & \text{Else} \end{cases}$$

$$pseudoT(N) := \frac{Dist(N, N_C)}{V_{MoMo}}$$

$$EV_6^{pseudo}(N) := (1 - \omega_6) \cdot EV_5(N) + \frac{\omega_6}{pseudoT(N) + 1}$$

EV<sub>1</sub> から EV<sub>4</sub> までの条件の積で求めた評価結果例を以下に示す。



さらに、提案した手法による既存の知能空間との比較実験を行った結果を以下の表に示す。表の中の数値は対象の位置と向きを多様に変化させたときのデバイスがサービスを行える位置にあったかを表している。

Environment	iSpace	R+iSpace
Map1	37.5% <sub>(3491/9301)</sub>	98.5% <sub>(9158/9301)</sub>
Map2	36.8% <sub>(3389/9208)</sub>	98.0% <sub>(9024/9208)</sub>
Map3	36.5% <sub>(3306/9051)</sub>	98.2% <sub>(8886/9051)</sub>
Map4	35.4% <sub>(2764/7800)</sub>	97.9% <sub>(7634/7800)</sub>

既存の知能化空間が固定されたデバイスを用いたため全体のケースに対して約3分の1しか対応できなかったのに対して提案手法では殆ど対応できたことが確認できる。

## (2) 最適経路生成と移動制御

経路計画アルゴリズムは7層のLayerで構成されており、それぞれのLayerがコストの算出を行う。Layer 0, Layer 1は、経路計画を行うMoMoの位置や、目的位置に関するLayer, Layer 2からLayer 5は他のMoMoとのデッドロックを回避するLayer, 残り1つは、移動時間を減少させる為、同一動作を防ぐLayerとなっている。そして、各Layerで算出したコストを統合し、MoMoの次の移動先を決定する。

Layer 0では、隣接ノードへの移動コストを算出する。移動コストの算出には、隣接ノードへの移動時間と、移動可能なノードであることを示すFlagNを用いる。MoMoが経路計画を行う際に、全てのMoMoがアクセスすることが可能な共有メモリには、障害物の位置と全てのMoMoの位置・姿勢が保存されており、MoMoは移動前に移動先となるノードの利用を予約する。MoMoは共有メモリの情報を用いて、Layer 0のコストを算出する。 $N_c$ と $Tr(N_c)$ への移動コストは、0と $T_{tr}$ と定義する。それ以外の隣接ノードへの移動コストは、時計回りか反時計回りのどちらか、小さい方を選択する。次式にLayer 0のコストを示す。

$${}_0Cost_{Ad(N_c)} = \begin{cases} {}_0Cost_{Tr(N_c)} = T_{tr} & \text{If } k = n_c \\ 0 & \text{Else} \\ \min(CW_j, ACW_{6-j}) + T_{sc} & \text{Else} \end{cases}$$

where,  $(k = 0, 1, \dots, 5) \wedge (j = (k - n) \bmod 6)$

Layer 1では、ゴールステーションSxg, ygから $Ad(N_c)$ への最短経路探索を行い、移動コストを算出する。最短経路探索は、障害物と他のMoMoを考慮したA\*を用いる。以下に移動コストの算出方法を示す。

$${}_1Cost_{Ad(N_c)} := f_v(Ad(N_c)) - f_v(N_c)$$

Layer 2では、Layer 1と同様に、ゴールステーションSxg, ygから $Ad(N_c)$ への移動コストを算出する。しかし、Layer 2では、他のMoMoを考慮せずに、障害物のみを考慮し、最短経路探索を行い、移動コストを算出する。

$${}_2Cost_{Ad(N_c)} := f_p(Ad(N_c)) - f_p(N_c)$$

Layer 3では、経路計画を行うMoMoの経路上に他のMoMoが存在し、デッドロックが発生してしまうことを回避する。デッドロックの発生例をFig.1に示す。また、それぞれのMoMoをMoMoA, MoMoBと表記する。MoMoBはGSBに到達している。しかし、MoMoAがGSAへ向かう際にMoMoBが移動の妨げとなる為、デッドロックが発生してしまう。このような状況の時、Layer 3を用いる。

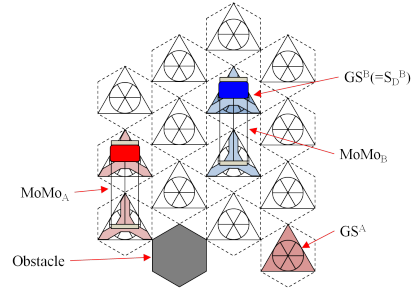


Fig.1 デッドロックの発生例

$${}_3Cost_{Ad(N_c)} := \sum_{\forall k \wedge k \neq i} OC_3(Ad(N_c^i), k)$$

Layer 3によって、MoMoはデッドロックが発生する状況の大部分を解決することが可能となった。しかしながら、Fig.2に示すような特別な状況ではMoMoBはGSBにたどり着くことができない。MoMoAはGSAに到着している。MoMoBがGSBへ向けて移動を行う際に、MoMoAが経路を妨げている為、Layer 3を用いて、MoMoAが回転移動を試みるが、MoMoBと障害物によって移動を行うことができない。したがって、MoMoAは他のノードに移動することが出来ず、デッドロックが発生してしまう。このような状況で、Layer 4を用いる。

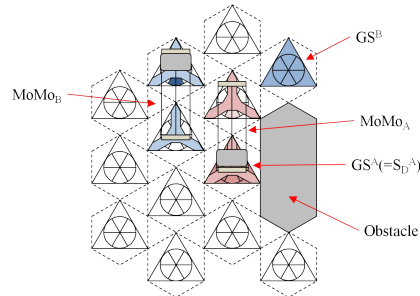


Fig.2 Layer 4が必要となる例

$$OC_4(N, k) := \frac{1}{(\text{Dist}(FC(N), S_b^k) + 1)^2} + \frac{1}{(\text{Dist}(FC(N), S_{nd}^k) + 1)^2}$$

$${}_4Cost_{Ad(N_c)} := \sum_{\forall k \wedge k \neq i} OC_4(Ad(N_c^i), k)$$

Layer 3に加えてLayer 4によって、更に大部分のデッドロックが発生する状況を解決することが可能となった。しかしながら、Fig.3のような状況では、2台のMoMoはゴールにたどり着くことができない。まず、MoMoBがGSA上にいるので、MoMoAがLayer 3を用いる。そうするとMoMoBがDG^Aから離れるように動き、その後MoMoAはGSAに到達する。しかし、 $w_2^A$ が0になる途中にMoMoBが移動を行えなくなる為、Layer 4を用いる。そうするとFig.3のような状況に戻ってしまい、デッドロックが発生してしまう。このような状況にLayer 5を用いる。

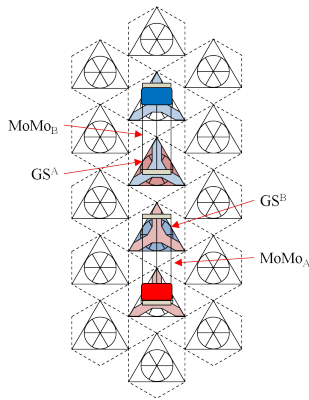


Fig.3 Layer 5 が必要となる例

$${}_5Cost_{AD(N_c)}^i := \begin{cases} 1 & \text{If } L_A^R(Ad(N_c)_x, Ad(N_c)_y) = 0 \\ 0 & \text{Else} \end{cases}$$

Layer 3・Layer 4・Layer 5 によってデッドロックが発生する状況の解決が可能となった。しかしながら、これまでのLayer で算出したコストはノードの位置に依存している。また、2つのノード間の反復動作を選択すると、目的位置への移動が遅くなってしまふ。したがって、Layer 6 では、反復動作を減少させる為、移動を行う前に利用していたノードのコストを一定時間増加させる。次式にLayer 6 のコストを示す。

$$Cost_{AD(N_c)}^i := \sum_{l=0}^6 w_l \cdot {}_lCost_{AD(N_c)}^i$$

最後に、これまで算出した全てのLayer のコストの統合を行い、最終コストの算出を行う。

$$Cost_{AD(N_c)}^i := \sum_{l=0}^6 w_l \cdot {}_lCost_{AD(N_c)}^i$$

MoMo は、次の移動先として最終コストの最も低い隣接ノードを選択し、移動を行う。以上の経路計画を目的位置に移動するまで繰り返す。以上の提案手法を、様々な環境下でシミュレーションした結果、有限時間内に 100% 各々の MoMo がゴールにたどり着くことが確認できた。

### (3) 新しい MoMo の開発

既存の MoMo の問題を解決するとともに提案アルゴリズムを実現するために効率よく安定した移動ができる新しい MoMo のプロトタイプを開発した。Fig.4 に新しい MoMo の設計図と実物の写真を示す。

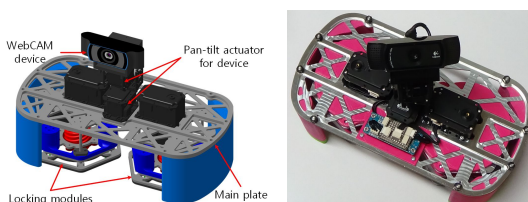


Fig.4 カメラデバイスを取り付けた新しい MoMo の例

本研究で新しく開発された MoMo は既存の MoMo より 1.5 倍速い 28.0mm/s の速度で動くことができ、過去より素早くデバイスを最適に配置することができるようになった。

### 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 6 件)

1. JongSeung Park, Joo-Ho Lee, Best Effort Location for a Device in Reconfigurable Environment, Journal of Advances in Information Technology, 査読あり, 7 巻, 2016, pp.146-155, 10.12720/jait

[学会発表](計 11 件)

1. JongSeung Park, Joo-Ho Lee, The pin-lock based moving mechanism of wall climbing robot for the Reconfigurable Intelligent Space, 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2015.7.9, Seoul(Korea).

[図書](計 1 件)

1. Jongseung Park, Joo-Ho Lee (Editor: Mohammad Ilyas, Sami S. Alwakeel, Mohammed M. Alwakeel, El-Hadi M. Aggoune), CRC Press, Sensor Networks for Sustainable Development, 2014, 568pages.

[産業財産権]

取得状況(計 1 件)

名称: 空間制御システム  
 発明者: 李周浩, 朴鍾承  
 権利者: 学校法人立命館  
 種類: 発明特許  
 番号: P6095041  
 取得年月日: 2017.2.24  
 国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.aislab.org/index.php/theme/>

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

李周浩 (LEE JOOHO)  
 立命館大学・情報理工学部・教授  
 研究者番号: 80366434