ローカルマップ統合によるユーザとモノの屋内位置推定

Simultaneous Position Estimation of both User and Object in Indoor Environment
based on Integrating Local Maps

○ 石原 達也 (NTT) 正 中村 幸博 (NTT)
正 武藤 伸洋 (NTT) 阿部 匡伸 (NTT)

Tatsuya ISHIHARA, NTT, ishihara.tatsuya@lab.ntt.co.jp
Yukihiro NAKAMURA, NTT
Shin-yo MUTO, NTT
Masanobu ABE, NTT

We propose a new method that can simultaneously estimate the positions of both user and sensors attached to objects in indoor environments. The position estimation of them is achieved by hierarchically structuring local positioning and global positioning. In local positioning, local maps are automatically generated and updated continuously, in addition to estimating the user position simultaneously by utilizing the suitably selected log data for improving the accuracy of position estimation according to a reliability factor in the user model combined with SLAM. In global positioning, the global map is automatically generated by integrating local maps, focusing on the common sensors which exist on two or more local maps and the distances (which are weighted by likelihood on the local map) between sensors. Advantages of the proposed method are (1) calibration free, (2) dynamic extension of covered area. Evaluation results show that estimation errors were less than 400mm in both user and sensors positions, and small enough to develop context-aware indoor service taking into account the personal space.

Key Words: Position estimation, Auto-calibration, SLAM

1. はじめに

近年、ネットワークの高度化ならびにセンサなどのデバイスの小型化に伴い、ユビキタスコンピューティングやウェアラブルコンピューティングを用いたサービスが現実味を帯びてきた。これら技術を利用して、ユーザの周辺にある家具や机、ソファといったモノの空間配置とその空間内でのユーザ位置を取得することができれば、様々な用途への展開が期待できる。たとえば、ユーザがテレビ周辺のソファにいるとシステムが判断した場合には、ユーザが携帯する端末にテレビの操作パネルを提示するといった、ユーザの状況に応じたサービスが期待される。このようなサービスを実現するためには、1.2m程度のいわゆるパーソナルスペース[1]を識別できる精度で位置を推定することが求められると考えられる。

屋外であれば GPS を利用することによりユーザやその周辺の建物などの位置を取得することができる。一方、屋内でのユーザやその周辺のモノの位置をセンシングするシステムはまだ実用に至っていない。

我々はこれまでに、ユーザ周辺の家具、机、イスなどのモノにセンサを取り付け、それらセンサとの相対距離を計測できる計測端末をユーザが携帯し、ユーザの移動とともに逐次計測される相対距離情報を用いることでユーザ周辺のモノの空間配置とユーザの位置を推定する手法を提案し、性能評価を行ってきた[2]。しかしながら、この手法では、予め定めた代表となるセンサ（代表センサ）が計測端末と常に距離計測を行う必要があった。そのため、これらセンサの計測レンジを外れるような環境での適用が困難であった。そこで、本稿では、通信端末が同時刻に距離計測を行ったセンサ集合に代表センサが存在しない場合には、それらセンサ集合の中から新たに代表センサを定め、新規にモノの空間配置（ローカルマップと呼ぶ）を逐次生成し、それらマップを統合することで全体的なモノの空間配置（グローバルマップと呼ぶ）とその空間中でのユーザの位置を推定する手法を提案する。また、提案手法の実環境における性能評価結果について報告する。この手法によって、センサの設置箇所を考慮することなく、

設置するセンサの厳密な位置合わせやセンサセットアップに必要なキャリブレーションが不要となるため、屋内でのユーザやモノの位置センシングのための導入コストを抑えながら、さまざまなサービスへの展開が期待できる。

2. ローカルマップの統合

本研究では、ID を付与された複数のセンサを生活環境中の TV、机等の任意のモノに分散配置する。そして、それらセンサと通信して相対距離を計測する計測端末をユーザが携帯し、日常生活においてユーザが空間中を移動することを利用して、その環境における計測端末とセンサの位置を同時に推定する手法を提案する。以降、モノとユーザをそれぞれセンサと計測端末に対応付ける。

このような環境におけるユーザとモノの位置推定を 2 つのステップにより実現する。Step1) センサセットアップの低減化を図るべく、環境中におけるランドマーク位置とロボット位置の同時位置推定を実現できるロボット工学における SLAM[3]に着目し、逐次変化する代表センサの組合せに応じたローカルマップの生成と計測端末の位置推定ならびにそれら推定位置の尤度を算出する。Step2) 逐次形成される各ローカルマップに共通して存在するセンサと、ローカルマップにおける各センサ推定位置の尤度により新たに定義される信頼度によって重み付けされたセンサ間距離に着目してグローバルマップの作成を行う。ついで、グローバルマップの情報を用いて計測端末位置の算出を行う。以降、Step. 1) と Step. 2) の処理をそれぞれローカルポジショニング[2]、グローバルポジショニングと呼ぶ。

3. 定式化

本節では、グローバルポジショニングを定式化する。グローバルポジショニングでは、通信端末が同時刻に距離計測を行った代表センサの組み合わせ毎に生成された複数のローカルマップ間に共通して存在するセンサに着目し、これらロー

カルマップを 1 つのローカルマップ（以降、基準マップと呼ぶ）に設定された座標系上に統合することでグローバルマップの生成を行う。ついで、グローバルマップの情報をもとに計測端末の位置推定を行う。以降、説明のため、ローカルマップ Σ_0 を基準マップとする。

3.1 ローカルマップの統合判定

二次元平面の場合、異なるローカルマップに 3 個以上の共通センサが存在すればそれらセンサを利用して 1 つのマップに統合することができる。この点に着目して、統合可能なローカルマップの組み合わせを探索し、基準マップに対する各ローカルマップの結合関係を抽出する。具体的には、各ローカルマップが基準マップと統合する際に経由する最小のローカルマップの数（ホップ数と呼ぶ）を算出する（図 1）。

3.2 信頼度を用いたセンサ間加重平均距離

ローカルポジショニングにおいて算出された各センサ推定位置から各ローカルマップにおけるセンサ間距離の算出を行う。ついで、算出されたセンサ間距離を用いてグローバルマップにおけるセンサ間の距離推定を行う。

複数のローカルマップにおいて同一のセンサの組合せがある場合、それらローカルマップ上で算出されたセンサ間距離は各ローカルマップによって異なる。そこで、各ローカルマップで算出されたセンサ間距離の信頼度を新たに定義し、その信頼度を用いた加重平均を用いてグローバルマップにおけるセンサ間距離を算出する。これにより、センサ間距離が一意に求まるだけでなく、ローカルマップ上で算出された信頼度の低いセンサ間距離の影響を低減させることが可能となる。センサ間距離の信頼度は、距離算出に用いた 2 つのセンサ推定位置の精度を考慮するため、ローカルポジショニングにより算出されたこれら推定位置の尤度の積で表現する。

例えば、 S_{ij} をセンサ i とセンサ j を含むローカルマップの集合とし、 k_{Lij} 、 $k_{w_{ij}}$ をそれぞれローカルマップ Σ_k 上で算出されたセンサ i - j 間の距離とその信頼度とした場合、グローバルマップ上でのセンサ i - j 間の距離 $\bar{L}_{ij}$ は、以下のようにして求める。

$$\bar{L}_{ij} = \frac{\sum_{k \in S_{ij}} k_{w_{ij}} k_{Lij}}{\sum_{k \in S_{ij}} k_{w_{ij}}} \quad (3.1)$$

3.3 基準マップにおけるセンサと計測端末の位置推定

センサ間の加重平均距離を用いてグローバルマップにおける各センサ位置を算出する。その場合、1) 全体の位置推定誤差が最小になるように位置算出を行う方式と、2) 原点に近いセンサから順次位置を確定させていく方式が考えられる。1) の方式では、誤差が均一になるように各センサ位置を算出することができる。一方、2) の方式では、順次位置を確定させていくため、位置推定を行うごとにそれまでに算出されたセンサ位置の推定誤差が重畳するが、原点に近いセンサほど位置推定の誤差を抑えることができる（図 1）。

我々は、ユーザの状況に応じたサービスにおいては、ユーザ周辺のモノの空間配置が特に重要であると考え、そこで、グローバルマップ生成において、ユーザがいるローカルマップを基準マップと設定し、基準マップと結合関係が明らかになったローカルマップに対してホップ数の昇順に順次統合する。具体的には、ホップ数の小さいローカルマップ上に存在するセンサから順に式(3.2)を用いてセンサ i の位置修正量

Σ_x : Local map $X(X=0,1,2)$

D_x : Number of hops of local map $X(X=0,1,2)$ from standard map

○ : Sensor position

□ : Existing region of sensor

Fig.1 Integrating local maps

Δx_i を算出し、センサ i の位置を更新する。ついで、 G に属する全センサの位置修正量を算出するごとに式(3.3)の評価値を算出する。ここで、 i 、 x_i 、 g_i 、 G 、 N はそれぞれセンサ ID、センサ i の二次元座標値、センサ i と同一のローカルマップ上に存在するセンサの中で既に位置算出が行われたセンサ ID の集合、基準マップと統合可能なローカルマップ上に存在するセンサ ID の集合、 G の要素数である。このとき、式(3.2)が予め定めた閾値よりも大きい場合は、再度式(3.2)を用いて順次センサ位置の修正を行う。これにより、ユーザ周辺のモノの空間配置の精度を高めながらも、全体のセンサ推定位置の誤差を抑えることができる。

$$\Delta x_i = \sum_{j \in g_i} \frac{x_i - x_j}{|x_i - x_j|} \left\{ \bar{L}_{ij} - |x_i - x_j| \right\} \quad (3.2)$$

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j \in g_i} \left\{ |x_i - x_j| - \bar{L}_{ij} \right\}^2, i, j \in G \quad (3.3)$$

計測端末位置 (x_u, y_u) に関しては、基準マップ上にマッピングされたセンサ推定位置 (x_i, y_i) とセンサ計測値 $d_i(t)$ から式(3.4)を解くことで算出する。ただし、 U は計測端末が計測したセンサ ID の集合である。

$$d_i(t)^2 = (x_i - x_u(t))^2 + (y_i - y_u(t))^2 \quad (3.4)$$

$i \in U$

4. 実験

実環境におけるグローバルポジショニング手法の性能評価を行うべく、超音波センサを用いた実験を行った。

4.1 目的と条件

環境中の机などの任意のモノに設置した超音波タグとユーザが所持した超音波受信機の位置推定を行った。実験環境図と超音波タグ設置条件ならびに実験条件をそれぞれ図 2、図 3、表 1 に示す。実験では古河機械金属（株）[4]製の超音波受信機（ZPS-MK）をカートの先端に取り付け、超音波タグが物に取り付けられた環境内でユーザがカートをランダムに移動させた。なお、超音波受信機と各超音波タグ位置の参照位置は 3 次元位置の推定誤差が 30mm 程度である本実験とは別の超音波センサシステム（ZPS-3D）を用いて計測した（図 2）。

4.2 実験結果と考察

4.2.1 利用可能なエリアの拡張性

各ローカルマップ上で算出されたタグ ID とホップ数を表 2 に示す。ユーザがカートを移動させることにより 27 個のロー

カルマップが生成された。そのうち、10個のローカルマップ上でタグの位置算出が行われた。

本手法では、ユーザの移動範囲が狭いことに起因して増加する位置推定誤差の影響[2]を回避するため、ローカルポジショニングにおいてログデータ選択の評価値に閾値を設定している。位置算出が行われなかったローカルマップが生じたのは、ユーザの移動範囲が狭かったことで閾値を満たす距離データを取得することができなかったことに起因する。

また、グローバルマップに統合されたローカルマップ数とタグ数の時間経過を図4に示す。グローバルマップに統合されるローカルマップとタグの数が、時間経過にともなって増加していることがわかる。これらから、代表センサ（タグ）が異なる場合においても、共通するタグに着目して複数のローカルマップを統合することで、各タグの位置推定範囲を拡張できる見通しを得た。

Fig.2 Experimental environment

Fig.3 Location of tags in experiment

Table 1 Experimental conditions

Receiver	•Movement region: inside of arrangement sensors •Receiving range: 190 deg
Tag	•Transmission range: 190 deg
Other	•Standard map: 0-th local map •Sampling rate: 1s

4.2.2 位置推定精度

1) 超音波タグの推定誤差

グローバルポジショニングにより算出されたタグの位置推定精度を確認するために、ローカルマップ Σ_0 を基準マップと設定し、基準マップ上におけるタグの参照位置と推定位置間の距離を推定誤差として評価した。時間経過に伴う各タグの位置推定誤差の結果を図5、図6に示す。時間の経過に伴い、センサの誤差が全体的に収束していることが分かる。一方、タグ6（図6）については、誤差が500s付近で一時的に増加している現象が見られた。詳細に分析した結果、タグ6の位置算出を行ったローカルマップは3, 15, 23であった。これらマップがグローバルマップに統合されたタイミングにおける、各ローカルマップでのタグ6の推定誤差結果を表3に示す。これから、タグ6の推定誤差の一時的な増加は、ローカルマップ15で推定された位置誤差の大きいタグ6の位置情報がグローバルマップに写像されたためと考えられる。提案したグローバルポジショニングでは各センサ位置の尤度の加重平均を利用しているため、過度な位置誤差が生じていないが、今後、改善しなければならないと考える。

つぎに、各センサ位置が収束した状態と見られる時刻529sにおける各センサ位置推定誤差の結果を表4に示す。表4より時刻529sにおける各タグ位置の平均推定誤差は平均311.7mmであり、パーソナルスペースを識別できる精度で位置を推定できる見通しを得た。一方、表4からタグ4, 5, 6の位置誤差は、タグ0, 1, 2, 3, 7のそれに比べて大きくなった。誤差の要因として、1) ローカルポジショニングで推

Table 2 Tag ID on each local map and number of hops of each local map

Local map ID	Tag ID	Number of hops
0	0,1,2,3,4,7	0
2	0,1,3,4	1
3	1,3,4,5,6	1
4	1,4,5	2
5	2,4,5	2
6	1,2,3,7	1
12	3,4,5	2
15	4,5,6,3	2
18	0,2,3,4,5	1
23	3,4,6	2

Fig.4 The number of local maps and estimated tags on global map

定されたセンサの推定誤差, 2) グローバルポジショニングで推定されたセンサの推定誤差が考えられる. 提案しているローカルポジショニングでは, ユーザが環境内を動き回り, さまざまな場所で計測されたセンサと計測端末間の距離を利用して位置を推定している. それゆえ, 広範囲な場所で得られた距離データを利用できれば, 推定精度の向上が見込めると考える. 逆に, 狭い範囲の場所で得られた距離データしか利用できない場合には, 推定されたセンサの推定誤差が必然的に大きくなると考えられる. また, 提案しているグローバルポジショニングでは, 基準マップからのホップ数が小さいローカルマップ上のセンサ位置から順次推定し, 新たに推定するセンサの位置は, それまでに推定されたセンサの位置を基準に算出している. それゆえ, 基準マップからのホップ数が大きいローカルマップ上のセンサ推定位置は必然的に基準としたセンサの位置誤差が蓄積される. タグ 4, 5, 6 の位置誤差が他のタグの位置誤差に比べて大きい原因はこれらが要因と考えられるが, 今後, さらなる誤差の要因分析が必要と考える.

2) 超音波受信機の推定誤差

提案した手法による受信機の位置推定を評価するために, 実験中の基準マップ上における受信機の参照位置と推定位置の間の誤差を調べた. 時間経過に伴う受信機の推定誤差を図 7 に示す. 図 7 より, 時間経過に伴って推定誤差が小さくなる傾向が見られる. 提案しているグローバルポジショニングでは, グローバルマップ上で位置が確定したセンサの中で, ユーザを計測したすべてのセンサとユーザ間の距離を利用してユーザの位置を算出する. それゆえ, 時間経過に伴ってユーザ位置算出に利用可能なセンサの数が増加し, 結果としてユーザの位置推定誤差が小さくなったと考えられる. また, 受信機位置の推定誤差は平均 375.6mm であり, パーソナルスペースを識別できる精度で位置を推定できる見通しを得た.

Fig.5 Estimated position tag-i (i=0-3) error

Fig.6 Estimated position tag-i (i=4-7) error

5. まとめと今後の課題

本研究では, 代表センサの組み合わせ毎に生成される各ローカルマップ上に共通して存在するモノに着目してそれらマップを統合し, 全体的なモノの空間配置 (グローバルマップと呼ぶ) とその空間中でのユーザの位置を推定する手法を提案した. ついで, 超音波センサを用いた実験により提案手法の性能評価を行い, パーソナルスペースを識別できる精度で位置を推定できる見通しを得た.

今後はユーザが計測端末を所持した環境においても適応可能なシステムの検討ならびに提案手法を用いたサービスの検討を行う.

文 献

- [1] E.Hall, :The Hidden Dimension, Anchor Books, 1990.
- [2] 石原達也, 中村幸博, 武藤伸洋, 阿部匡伸, 下倉健一郎, "SLAMを用いたユーザやモノの同時位置推定", ロボティクスメカトロニクス講演会, 2A1-C10, 2009.
- [3] S.Thrun, W.Burgard, and D.Fox, :Probabilistic ROBOTICS, The MIT Press, 2005.
- [4] <http://www.furukawakk.jp/>

Table 3 Estimated tag-6 position error when each local map was integrated with global map

	Time each map was integrated s	Estimated position error mm	Likelihood
Local coordinate 3	148	200.0	0.34
Local coordinate 15	475	3910.0	0.31
Local coordinate 23	513	220.0	0.35

Table 4 Estimated position error

Terminal	Mean error	375.6
	Standard deviation of e mm	342.6
Tag-0	Estimated error e at time 529s mm	0.0
Tag-1		237.5
Tag-2		240.5
Tag-3		148.3
Tag-4		451.3
Tag-5		525.1
Tag-6		516.1
Tag-7		62.8
Mean error of estimated tag position at time 529s mm		311.7

[5]

Fig.7 Estimated user position error