

協調ポジショニングシステムの研究

- 第7報：CPS アクティブタッチ融合型地図生成法 -

Study on Cooperative Positioning System

- Map Creation by CPS Based Active Touch -

○ 正 倉 爪 亮 (東工大)
岩崎倫三 (東工大)

正 広瀬 茂男 (東工大)

Ryo Kurazume, Hirose Shigeo, and Tomomitsu Iwasaki
Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

To realize the automatic creation of an environmental map using a mobile robot, i) accurate positioning of the mobile robot itself and ii) accurate and reliable measurements of the relative positions of the surroundings are requisite. However, conventional methods for i), such as dead-reckoning or the placement and measurement of several landmarks, have low accuracy of position measurement. In addition, some typical devices that are used for ii), such as CCD cameras, ultrasonic sensors, and laser range finders, are likely to produce inaccurate measurements depending on lighting conditions and problematic objects, such as mirrors. In this paper, a new method named "Map Creation by CPS Based Active Touch" that is able to create an environmental map with high accuracy and reliability is proposed. This method employs the "Cooperative Positioning System (CPS)" that we have proposed for mobile robot positioning and "active touch" that is able to gather highly reliable information from a robot which contacts its surroundings as it moves. Furthermore, we propose a bumper mechanism that can be utilized not only to absorb shock but also to realize purely mechanical wall following behavior. Experiments in an indoor environment show that the proposed method is able to create an accurate environmental map of the positions of major features such as walls, pillars and doors.

Keywords: CPS, Multiple robots, Cooperation, Position identification, Map creation

1 はじめに

移動ロボットが自律的かつ効率的に作業を行うためには、移動すべき環境の状態を記述した「地図」情報をその制御システムの中に保持していることが不可欠である。例えば、駅構内やビル内部の床面清掃作業を効率よく実施するロボットの実現のためには、柱や壁面など作業空間の実際の状況を計測した現実的な地図が必要である。これまでに計測用移動ロボットを環境内を巡回させ、地図情報を効率良く獲得する方法がいくつか提案されているが [4]-[10]、それらは共通して、

- i. まず、その移動ロボット自身の位置同定を出来る限り正確に行う。
- ii. 同時に、移動ロボットから壁面や什器その他の相対位置関係を何らかのセンサによって正確に計測する。

そして、最後にそれらの情報を組み合わせ最終地図を作成するという手順を取っている。しかし、まず (i) で一般に使用されるデッドレコニング法 [4]-[6] には、同定誤差が移動とともに蓄積するという問題があり、また観測し位置を計測し終えた環境地図上の特徴点をランドマークとし、それを基準として自己位置同定を繰り返す手法 [7]-[9] では、一般の環境の特徴点をランドマークとする限り、そのような点は必ずしも高精度に計測できるわけではないことなど、これら従来手法では未知環境における移動ロボット自身の位置同定の高精度化は困難であった。一方、(ii) における移動ロボットから環境状態の計測手法については、これまで CCD カメラや超音波センサ、またレーザレンジファインダなどを用いた方法などが提案されている [7],[8],[10]。これらの手法は計測対象に直接接触れるものでないため計測により環境に影響を与えない特徴を持っていて、CCD カメラによる手法では照明状態などで誤動作が生じやすい、超音波センサは壁面のコーナー部などでの計測精度が上げられない、さらに CCD カメラ、レーザレンジファインダとも、ビル内で良く使用されるようなガラス壁面では誤動作をしやすい、などの問題点を残していた。

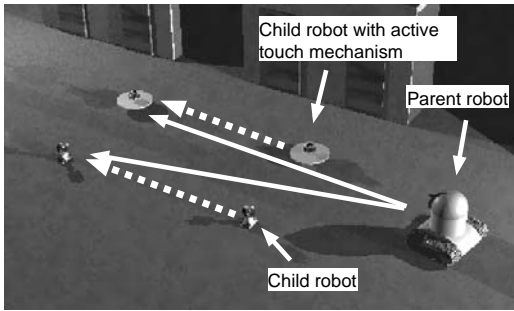
そこで本研究では、(i) の移動ロボット自身の位置同定には我々が現在研究を行っている「協調ポジショニングシステム (Cooperative Positioning System, CPS)」を用い、(ii) の移動ロボットから環境の状態を計測する手法としては、移動ロボットを実際に環境に接触させるという「アクティブタッチ」方式を用いた「CPS アクティブタッチ融合型地図生成法」を提案し、高精度地図生成を実現することとする。

2 CPS アクティブタッチ融合型地図生成法

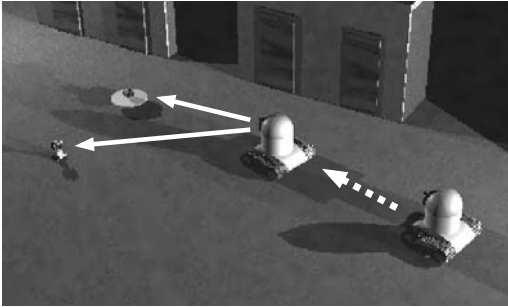
「アクティブタッチ」方式 [11],[12] とは、移動ロボットが実際に環境に接触しながら移動しその状態を計測することで、外部環境をより高い確度で認識する手法である。本手法は、階段などレーザレンジファインダ等を用いた手法では計測が困難な対象や計測条件が悪い環境、また計測データの信頼性が十分でない判定される場合などにおいても、実際に測定対象に近づき接触して計測することから、より信頼性の高い手段として使用することができる。

また協調ポジショニングシステム (CPS) とは、これまで我々が提案してきた複数ロボットを用いて協調的に自己位置同定を行う手法 [1],[2],[3] である。この手法はロボット群内部の局所的情報を用いるため未知環境でも使用でき、また車輪回転角等を用いないため不整地環境でも高精度な位置同定が実現できる。さらにこの手法は、移動中に子ロボットが壁面や什器に衝突しても計測精度が低下しないという著しく有効性の高い特性を有する。そのため、CPS はその群ロボットの一部を「アクティブタッチ用の移動ロボット」と使用すれば、それだけで環境と実際に接触しながらその状態を確実に計測するシステムを容易に構成できるという特性を有している。

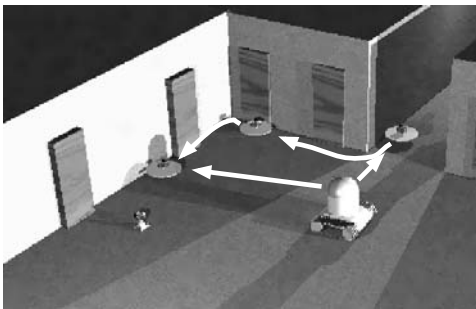
これら CPS とアクティブタッチを組み合わせた「CPS アクティブタッチ融合型地図生成法」の一例を Fig. 1 に示す。このシステムはレーザレンジファインダを搭載した親ロボットと、コーナキューブ及びアクティブタッチ



(a) Child robots move and have their positions measured



(b) Parent robot moves and measures its position



(c) Environmental map is created by active touch

Figure 1: Concept of map creation by CPS based active touch

機構を搭載した複数の子ロボットからなる。通常は Fig. 1(a),(b) に示すように、親ロボットと子ロボット交互の移動、相対位置計測を基本とした CPS により位置同定を行いながら移動するが、環境地図を作成する領域に到達した場合には、Fig. 1(c) に示すように、まず親ロボットを静止させ、子ロボットの一部を壁面や什器に接触させながら移動させる。次に親ロボットに搭載したレーザレンジファインダにより子ロボットのコーナキューブを追跡し、壁面や柱の位置、形状などの正確な環境地図を作成する。また子ロボットは、環境地図が作成できた時点で壁面追従動作を中止し、新たな壁面の探索や長距離移動のための CPS 動作を実施できるようにしておく。実際の運用では、子ロボットが観測不能になった時点で、観測可能と思われる地点へ親ロボットを移動させるなど、それまでに得られた環境地図を基にした群全体の動作計画を新たに行う必要があるが、これは今後の研究課題とし本報告では取り扱わない。

本手法の特長は、長距離の移動時には CPS を用い、環境地図の作成時には静止した親ロボットからアクティブタッチ用ロボットへの観測を利用するため、広範囲の環境地図作成作業でも高い精度が維持できること、アクティブタッチを用いるため信頼性の高い地図作成が可能であること、また CPS で使用するレーザレンジファインダを

地図作成に利用するため、新たなセンサの付加が必要ないことなどが挙げられる。

一方、本手法の問題点として、環境が床面上からのほぼ垂直な面で構成されている必要があること、アクティブタッチを行うことによるロボットの破損や故障、環境へ与える予測不可能な影響、アクティブタッチ用ロボットが隠された場合の処理などが挙げられるが、ビル内部の清掃作業のための地図作成など、使用する環境や目的を限定し、またデッドレコニングなどと併用すれば、これらは問題にはならないと考える。

3 メカニカル壁面追従を行うアクティブタッチ機構

本章では、アクティブタッチを行う移動ロボットの構成例として、センサを一切用いずメカニカルに壁面追従を行うアクティブタッチ機構を示す。この機構は Fig. 2 に示すように円板と長短2つのリンクからなり、円板とリンクは円板中心軸で自由に回転する。2つのリンクはお互いバネで結合されており、短リンクの先端はロボット本体に進行方向と直角になるように固定されている。ロボット本体は上方から見て円板の内部に収められ、外部環境との衝突は常に円板外縁部で生じるようにしている。環境との接触により生じた衝撃力は、短リンクによるオフセットとバネにより緩和されロボット本体に伝わるため、本機構は衝撃吸収のためのバンパ機構としての機能も有する。ただし衝撃力の方向が短リンクの方向に等しい場合には、衝撃力は緩和されずにロボットに直接伝えられるが、ロボットの進行方向は通常、短リンクに垂直であることから、この状態の生じる可能性は低いと考えられる。

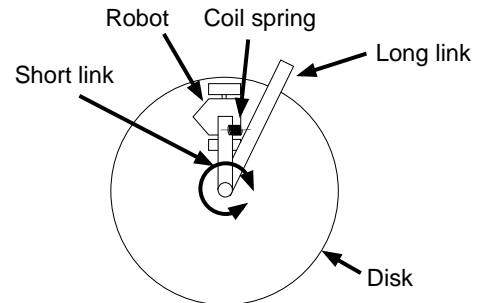


Figure 2: Active touch mechanism

本機構を移動ロボットに取付けることにより、近接センサや触覚センサなどを一切用いず凸凹の頂点を有する壁面を離れることなく移動する、メカニカル壁面追従動作を実現できる (Fig. 3(1))。また、ロボットが壁面追従運動中に別の壁面に衝突した場合など、凹状の頂点を移動する場合には、まず円板の回転が止められてロボットは円板軸周りに回転運動し (Fig. 3(2))、ばね力と推進力が釣り合った点で壁面に添って移動を開始する (Fig. 3(3),(4))。さらにロボットが凸状の頂点を移動する場合には (Fig. 4(1))、ロボットが頂点を通過した後に長リンクが頂点に接触してロボットの進行方向を頂点の内側方向に変え (Fig. 4(2),(3))、壁面から離れることなく移動を継続する (Fig. 4(4))。

4 室内環境地図の作成実験

提案したメカニカルアクティブタッチ機構の基本動作と CPS アクティブタッチ融合型地図生成法の実現可能性を検討するために、アクティブタッチ機構とコーナキュー

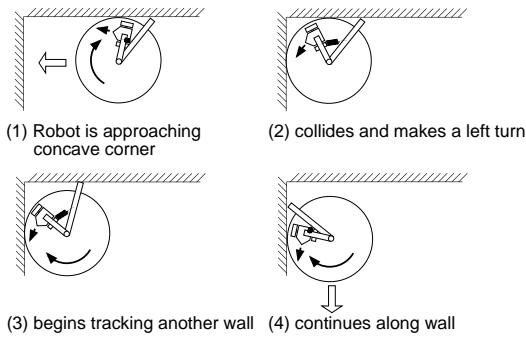


Figure 3: Passing concave corner

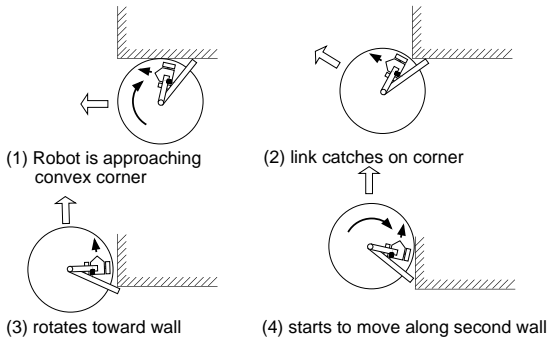


Figure 4: Passing convex corner

ブを搭載した子ロボットと、コーナキューブのみを搭載した2台の子ロボット、及び高精度レーザレンジファインダを搭載した親ロボットの計4台のロボットを試作し、室内環境地図作成実験を行った。実験の様子を Fig. 5 に示す。

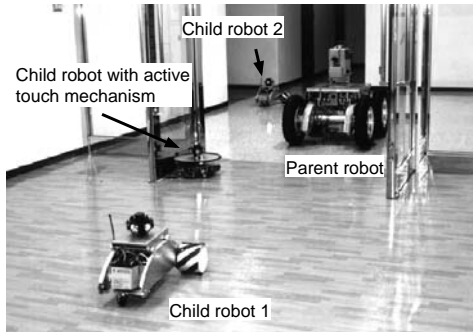


Figure 5: CPS-III and child robot with active touch mechanism

アクティブタッチ機構を搭載した子ロボットは、マイクロコンピュータ (8086-8MHz), DC モータ (3.8W × 2, マクソン製), モータ駆動回路 (TITech Moter Driver), バッテリ (6V × 2, 湯浅電池 (株) 製), 無線システム (HRF-600, ヘルツ電子 (株) 製) を搭載し、プログラムによる自律走行と遠隔操縦が可能である。またロボット上部には6つのコーナキューブが放射状に設置され、任意の方向から投射されたレーザ光を正確に投射方向へ反射できるようにしている。また2つの受動輪に取付けたエンコーダ、ポテンショメータにより、デッドレコニングによる位置同定も可能である。

また他の3台の親子ロボットには、著者らがこれまでに製作したCPS第三次機械モデルCPS-III [3] を用いた。このうち親ロボットに搭載したレーザレンジファインダ

(AP-L1, TOPCON 製) は、任意の三次元位置に置かれたコーナキューブの自動探索、追尾機構を有し、子ロボットに搭載されたコーナキューブまでの距離と方位を随時計測することで、子ロボットの相対位置を正確に計測することができる。またコーナキューブを搭載した2台の子ロボットは、移動のためのCPS動作のみに用い、壁面追従動作は行わないとした。

これらアクティブタッチ機構を搭載した子ロボットとCPS-IIIを組み合わせて、Fig. 6に示す2つの部屋とドア、柱、2つの廊下と階段からなる屋内環境において、壁面やドアの位置などの環境地図を作成する実験を行った。実験ではアクティブタッチ機構を搭載した子ロボットをA → B → C → Dの順に移動させ、子ロボットがドアに隠れるなど親ロボットにより観測できなくなった時点で、CPS-IIIの各ロボットを各7回ずつ移動させた。ただし、試作した子ロボットは現時点では階段など下りの段差を検出できないため、階段のあるB → C間は人手により搬送した。また部屋1と2は透明なガラス製の壁面とドアで仕切られており、さらに廊下幅の制限から親ロボットは廊下2に侵入できないとした。また本実験ではあらかじめ子ロボットのデッドレコニング等により、部屋全体の大まかな環境地図が得られているものとし、CPS-IIIの各ロボットの移動目標位置はあらかじめオフラインで与えた。

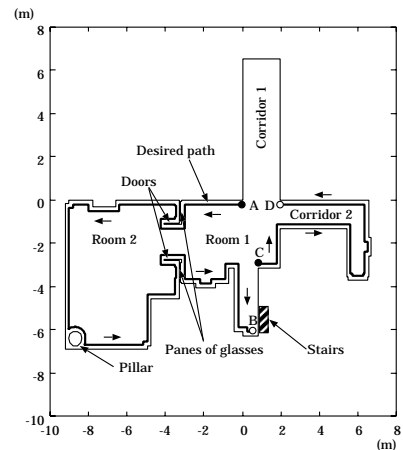


Figure 6: Environment for experiments

実験の結果、CPSの親ロボットによって推定されたアクティブタッチ用子ロボットの軌道をFig. 7に、CPS-IIIの各ロボットの移動の様子をFig. 8に示す。ただし、Fig. 7中の点線箇所は親ロボットにより子ロボットが観測できないため、子ロボットのデッドレコニングから推定された軌道である。このため、再び親ロボットにより観測を開始した時点で、デッドレコニングによる推定位置と新たに観測された位置に差が生じているが、このようにデッドレコニングと組み合わせることで、子ロボットが親ロボットから見通せない領域でもある程度の地図作成が可能であることがわかる。

またFig. 9に、アクティブタッチ用ロボットの軌道から推定された環境地図を、Table 1にデッドレコニングによる推定部分以外の環境地図と実測値との差を示す。前述のように部屋1と2は透明ガラス製の壁面とドアで仕切られているため、これまでに提案されているレーザレンジファインダやCCDカメラを用いて環境地図を作成するシステムでは、この透明ガラス製の仕切りが認識できない可能性が高い。しかし本システムでは、実際にロボットを壁面に接触させながら移動させ、ロボットの位置をコーナキューブを用いた精密な計測により計測するため、高精度かつ確度の高い環境地図作成が実現できる。

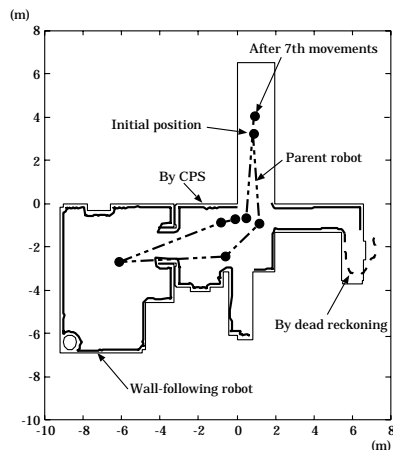


Figure 7: Paths of wall-following robot and parent robot measured by CPS

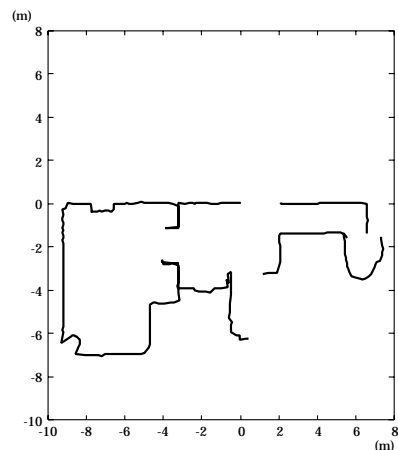


Figure 9: Acquired contour of rooms

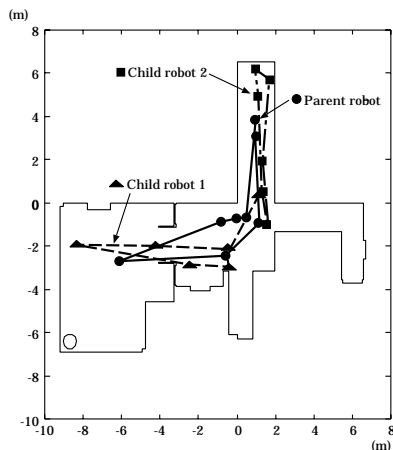


Figure 8: Moving paths of parent and child robots

5 おわりに

本報告では、著者らがこれまで提案した高精度位置同定法である CPS と、移動ロボットを実際に環境に接触させ走行させることで信頼性の高い情報を得る「アクティブタッチ」方式を組み合わせた「CPS アクティブタッチ融合型地図生成法」を提案した。さらに、アクティブタッチを行う移動ロボットの構成例として、センサを一切用いずメカニカルに壁面追従を行うアクティブタッチ機構を提案した。さらに屋内環境における環境地図作成実験を行い、本手法により壁面や柱の位置形状が正確に計測できることを確認した。

References

[1] 広瀬, 長田, 倉爪: “群ロボットによる協調ポジショニング法”, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.6, pp.838-845, 1995.

[2] 倉爪, 広瀬, 岩崎, 長田, 指田: “協調ポジショニングシステムの研究 - 冗長位置情報の融合と機械モデル実験 -”, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.8, pp.1229-1236, 1996.

[3] 倉爪, 広瀬, 岩崎, 長田, 指田: “協調ポジショニングシステムの研究 - CPS-II 型システムの最適化移動形態 -”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.5, pp.773-780, 1997.

[4] 石岡, 開, 安西: “MARSHA: 複数の自律移動ロボットの個体差を考慮した地図獲得システムの設計と制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.6, pp.846-856, 1994.

[5] N. Ayache and O. D. Faugeras: “Building Registration and Fusing Noisy Visual Map”, Proc. 1st Int. Conf. on Computer Vision, pp.73-82, 1987. ステレオ画像とデッドレコニングで地図生成

[6] 石黒, 山本, 辻: “能動的全方位視覚を用いた環境構造の復元”, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.5, pp.541-550, 1991.

[7] 中谷, 久保田, 谷田, 市江: “マップマッチング法による惑星探査ロボットの自己位置同定”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, Vol.A, pp.445-448, 1995.

[8] Elfes A.: “Soner-Based Real-World Mapping and Navigation”, IEEE J. of Robotics and Automation, Vol.RA. 3-3, pp.249-265, 1987.

[9] 西澤, 八木, 谷内田: “全方位視覚センサCOPISを搭載した移動ロボットのための環境マップの生成と移動自由空間の推定”, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.868-874, 1993.

[10] H. P. Moravec: “The Stanford Cart and the CMU Rover”, Proc. of the IEEE, 71, 7, pp.872-884, 1983.

[11] M. Rude: “A Flexible, Shock-absorbing Bumper System with Touch-sensing Capability for Autonomous Vehicles”, Proc. of IROS 96, pp.410-417, 1996.

[12] D. Jung and A. Zelinsky: “Whisker Based Mobile Robot Navigation”, Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems '96, pp.497-504, 1996.

Table 1: Errors of the obtained environmental map

Average	30.8	[mm]
Maximum	178.0	[mm]