

環境埋め込み情報に基づく自律移動ロボットの自己位置同定*

新井義和*¹, 藤井輝夫*², 浅間 一*²
藤田隆則*³, 嘉悦早人*², 遠藤 勲*⁴Self-localization of Autonomous Mobile Robots
using Information Buried in EnvironmentYoshikazu ARAI, Teruo FUJII, Hajime ASAMA,
Takanori FUJITA, Hayato KAETSU and Isao ENDO

Generally, in the self-localization method based on positions of landmarks, it is necessary for robots to manage the maps of the landmarks. In multiple robot systems, it is, however, difficult to keep the consistency among all the maps carried by the robots when the maps are updated frequently and dynamically. In this paper, we introduce Intelligent Data Carriers (IDCs) to realize map-free self-localization in multiple robot systems. The IDC is a portable data management device developed at RIKEN. By putting an IDC in the work area and storing its own position data in itself, robots can acquire the position of the IDC using local communication without referring to any maps. Detailed procedures to acquire and integrate various information are presented. The efficiency of the proposed method are discussed based on the results of the experiments. It is confirmed that this method is available for the robot to localize its own position in multiple robot environment.

Key Words: Self-localization, Intelligent Data Carrier, Landmark, Environment Map, Sensor Integration, Mobile Robot, Multiple Robot Systems

1. 緒 言

自己位置同定は、移動ロボットを制御する上で最も重要な機能である。自己位置同定手法として、内界センサからの情報に基づいたデッドレコニングが考えられるが、車輪の滑りなどから誤差が発生し、その誤差は移動とともに積算されるため、ランドマークなどの外部基準を用いて位置を補正する手法が広く用いられている^{(1)~(6)}。

一般に、検出された物体を実環境上のランドマークと対応づけるためには、ランドマークの位置情報をあらかじめ環境地図として管理する必要がある。あるエージェントが環境地図を集中的に管理する手法では、ロボットの台数の増加や環境変化の頻度の増加につれて、各ロボットと情報管理エージェントとの間の通信量が増大し、通信の停滞を引き起こす。また、各ロボットが環境地図を分散的に管理する手法では、ランドマークが見えなくなる、移動する、消失するあるいは新たに設置するなどの環境の動的な変化に対してラン

ドマークの位置情報を更新する場合、各ロボットの環境地図の整合性を保つことが困難となる。これに対し、環境地図を必要としない自己位置同定手法として、広瀬ら⁽⁷⁾はロボット自身をランドマークとし、複数のロボット間の位置情報管理のみによる手法を提案している。この手法は複数のロボットが同時に同じゴールを目指す場合には有効であるが、それぞれのロボットに異なるタスクや移動目標が割り振られるような状況では用いることができない。

そこで本論文では、著者らが開発してきた携帯形情報管理デバイスである知的データキャリア(Intelligent Data Carrier: IDC)⁽⁸⁾をランドマークとして用いた新しい自己位置同定手法を提案する。本手法は、環境の地図管理が不要であり、複数のロボットが動作する環境で特に有用であり、それぞれのロボットが別々の行動を行っている場合にも利用できる。

2. 位置情報の環境への埋め込み

2.1 IDC システムの概念 図1に IDC システムの概念を示す。IDC システムは、局所的無線通信により非接触でデータを読み書きすることができる IDC と IDC に対して情報の読み書きをするための Reader/Writer から構成される。IDC には CPU が搭

* 原稿受付 1997年3月24日。

¹ 准員, 埼玉大学大学院 (☎ 338-0825 浦和市下大久保 255)。² 正員, 理化学研究所 (☎ 351-0106 和光市広沢 2-1)。³ 東洋大学大学院 (☎ 350-0815 川崎市鯨井中野台 2100)。⁴ 理化学研究所。

載されており、内部で情報処理を行うことも可能である⁽⁸⁾。また、IDCはポータブルであり、ロボットによってもち運ぶことが可能である。Reader/Writerをロボットに搭載することによって、ロボットがIDC内に情報を書き込んだり、IDCから情報を読み出すことが可能となる。したがって、図1に示すようにIDCを環境内の荷物や壁や床などに取付け情報を書き込むことにより、環境自身に必要な情報を直接埋め込むことができる。このとき、IDCに近づいたロボットは、IDCとの局所的通信によってIDCに書き込まれた周辺環境に関する情報を読み出すことによって、その環境を把握するとともに、それに応じた行動をとることが可能となる。

2.2 IDCを用いた自己位置同定戦略 IDCをランドマークとして用い、IDCの位置情報をIDC内部に書き込んでおけば、環境地図に頼ることなくIDC自身から位置情報を直接取得することができる。この場合、環境の変化に対しても、変化を発見したロボットが随時IDCの情報を更新することにより、ランドマークとしての位置情報を常に最新の状態に保つことができる。すなわち、IDCをランドマークとして用いることにより、大局的環境地図の管理を必要としない自己位置同定が実現できると同時に、局所的、分散的

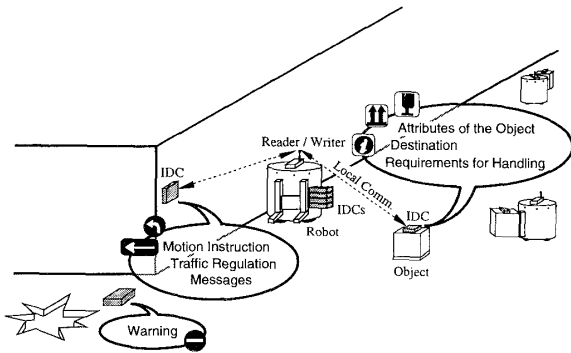


Fig. 1 Concept of IDC system

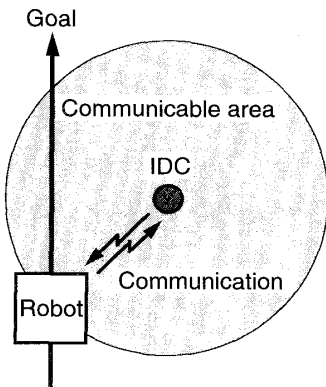


Fig. 2 Detection of IDC

な情報の管理のみで、動的に変化する環境条件への対応が可能となる。

2.3 位置情報の取得 IDCをランドマークとして用いるときのIDCの検出方法を図2に示す。あらかじめ位置情報を書き込んだIDCを、環境内に設置する。ロボットは、IDCとの通信が可能かどうかを常に試行しながら目的に向かって移動する。ロボットがIDCとの通信可能範囲(communicable area)に進入すると、IDCとの通信が確立し、IDCが検出される。通信可能範囲は、1mとなるよう調整されている。したがって、ロボットは視覚センサなどのセンシングを用いずに通信のみによって容易にIDCの存在を検出できることになる。検出後、IDCからの情報の読み出し、IDCへの情報の書き込みが可能になる。

3. 自己位置同定手法

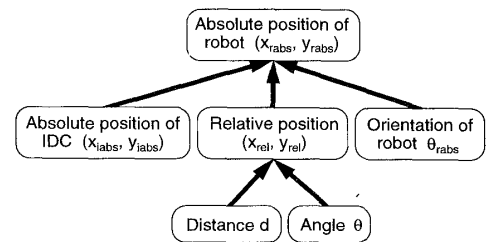
ロボットがIDCをランドマークとして同いる場合、IDCからIDCの絶対位置情報が得られれば、ロボットとIDCとの相対位置関係を計測することによって、ロボットの自己位置を同定することができる。本章ではIDCに書き込まれた位置情報に基づく自己位置同定の具体的手法について述べる。

3.1 自己位置の算出 IDCに書き込まれたIDC自身の絶対位置を (x_{iabs}, y_{iabs}) とすると、ロボットの絶対位置 (x_{rabs}, y_{rabs}) は、図3に示すように、ロボットのIDCに対する相対位置 (x_{rel}, y_{rel}) を計測することによって、以下のように算出される。

$$x_{rabs} = x_{iabs} - x_{rel} \sin \theta_{rabs} + y_{rel} \cos \theta_{rabs} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$y_{rabs} = y_{iabs} - x_{rel} \cos \theta_{rabs} - y_{rel} \sin \theta_{rabs} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで θ_{rabs} はロボットの絶対姿勢角である。ロボットのIDCに対する相対位置 (x_{rel}, y_{rel}) は、



Absolute position of IDC : Communication with IDC
 Distance d : Image processing
 Angle θ : Image processing
 Orientation of robot : Compass module

Fig. 3 Integration of information

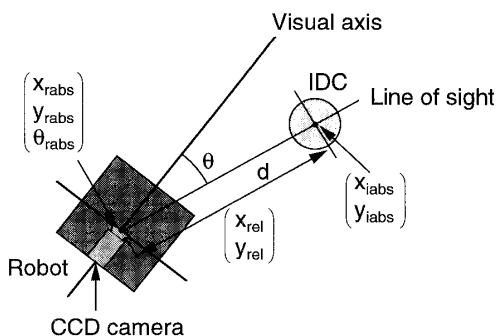
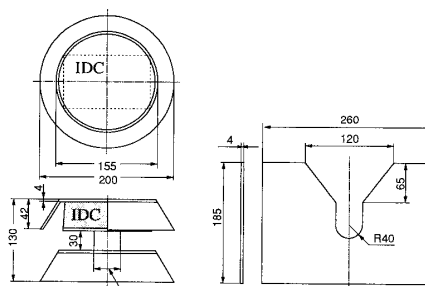


Fig. 4 Self-localization method



(a) IDC unit (b) Forklift guide
Fig. 6 IDC unit and forklift guide

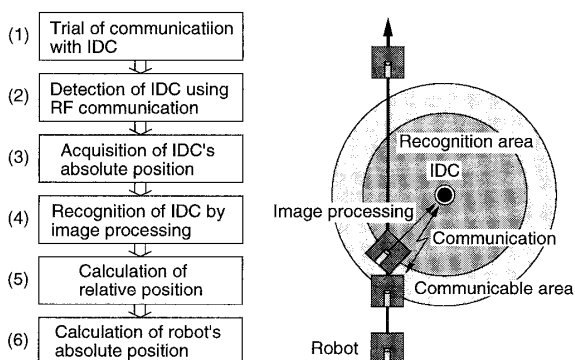


Fig. 5 Procedure of self-localization

$$x_{rel} = d \cos \theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$y_{rel} = d \sin \theta \quad \dots\dots\dots (4)$$

により算出できる。ここで d はロボットと IDC の間の距離、 θ はロボットに搭載されたカメラの視軸と IDC への視線のなす角を表す(図 4 参照)。以上の計算を行うためには、ロボットが搭載しているセンサを用いて θ_{rabs} 、 θ および d を得る必要がある。ここでは、 θ_{rabs} については、ロボットに搭載された地磁気方位センサによって、また、 θ および d については、CCD カメラの画像を処理することによって求める。

3.2 自己位置同定の手順 自己位置同定の手順を図 5 に示す。ロボットは、(1) IDC との通信の試行、(2) 通信を用いた IDC の検出および(3) IDC の絶対位置の取得を行う。次に、IDC の位置情報に基づいて移動あるいはカメラの角度を変化させることによって、IDC をカメラの視野の中心にとらえ、(4) 画像処理による IDC ユニットの認識を行う。ここで、IDC を確実に画像としてとらえることができる領域を認識領域 (recognition area) とする(図 5 参照)。この画像処理は、通信によって存在が検出され、絶対位置がわかっている IDC の画像平面上の位置を求めることを目的とする。また、画像処理によって得られる情報を用いて(5) 相対位置の算出を行う。以上により、(6) ロボットの自己位置を算出することができ

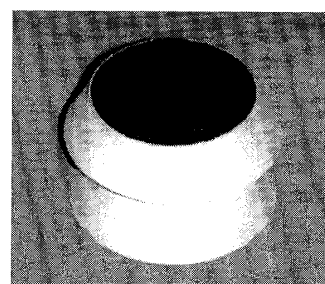


Fig. 7 Marker on IDC unit

る。

4. ロボットの IDC に対する相対位置の取得

4.1 IDC ユニット 著者らは、すでに開発した全方向移動ロボット⁽⁹⁾ にフォークリフト機構⁽¹⁰⁾ を搭載し、これによって IDC を環境の床面上に設置したり、床面上から回収したりすることとした。フォークリフト機構によって IDC をハンドリングできるように、

- (1) 複数のユニットを重ね合わせることができること
- (2) あらゆる方向から取扱い可能であることに留意して、図 6(a) に示すような形状の IDC ユニット⁽¹¹⁾ を設計した。

次に、単純な画像処理によってロボットと IDC ユニットとの相対位置関係を計測できるように、IDC ユニットの上面に円形のマーカを付した。図 7 に示すように、画像平面上では、マーカは IDC ユニットのの一部として投影されるので、明確なコントラストを得るために IDC ユニットの色を白、マーカの色を黒とした。またマーカは、ロボットと IDC ユニットとの位置関係によらず常に円形として現れるので、画像平面上の円を抽出することにより、容易にマーカを認識することが可能となる。

複数の IDC とロボットの間の通信の干渉を防ぐた

めに、IDC は、他の IDC に対して通信可能範囲の 2 倍以上の距離をおいて設置される。このとき、CCD カメラの視野を考慮すれば、同程度の距離にある複数の IDC が、同時にカメラの視野の中に現れることはない。また、複数の IDC が同時にカメラの視野の中に現れた場合、ロボットからそれらまでの距離は大きく異なる。以上のことから、画像平面内の最も大きいだ円を抽出することによりロボットが最も接近し、通信を行っている IDC を認識することができる。

4・2 マーカの認識 図 8 にマーカの認識の流れを示す。認識は、注目領域の抽出およびだ円の精細推定の 2 段階の処理に分かれる。

注目領域の抽出は、処理コストを低減するために、だ円が存在すると思われる領域を抽出することを目的とする。色差補正を行った後、マーカの領域を抽出するための 2 値化および領域分割を行い、重心を算出することによりだ円のおおよその位置を特定する [図 8(a)]。なお、重心の算出は領域分割の結果、最も大きい領域を対象とする。

だ円の精細推定は、まずエッジを抽出するために、Sobel フィルタを適用し、2 値化のあと、孤立したエッジをノイズとして消去する [図 8(b)]。画像平面上のだ円は図 9 のように表され、長軸半径 a 、短軸半径 b 、中心の座標値 (u_o, v_o) 、傾き θ_e を定義すると、以下のような式で表すことができる。

$$\frac{A^2}{a^2} + \frac{B^2}{b^2} = 1 \dots\dots\dots (5)$$

$$A = (v - v_o) \sin \theta_e + (u - u_o) \cos \theta_e$$

$$B = (v - v_o) \cos \theta_e - (u - u_o) \sin \theta_e$$

a, b, θ_e, u_o, v_o をパラメータとして、エッジ画像に対して Hough 変換を行うことにより五次元空間上のヒストグラムが作成され、その頂点をとることにより、

画像平面上のだ円の五つのパラメータの値が決定される。

4・3 相対位置の算出 だ円の推定により得られたパラメータから θ および d を求める。図 10 はロボット上に搭載されたカメラと IDC との関係を表している。カメラの視軸と IDC への視線とのなす角 θ は、検出されただ円の中心の座標 u_o を用いて次の式から算出される。

$$\theta = -\tan^{-1} \frac{u_o}{f \cos \theta_c} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 θ_c はカメラの仰角、 f はカメラのレンズから画像平面までの距離である。ロボットと IDC 間の距離 d は、ここで算出された θ および検出されただ円の長軸半径と短軸半径の比 T に基づいて次のように算出される。

$$d = \frac{h \pm \sqrt{h^2 + 4T^2 r^2 \cos^2 \theta_c}}{2T \cos \theta_c \cos \theta} - \frac{h \tan \theta_c}{\cos \theta} \dots (7)$$

$$T = \frac{b}{a}$$

このとき、 h はマーカからカメラまでの高さ、そして r はマーカの半径を示す。これら θ および d を用いれば、ロボットの IDC に対する相対位置 (x_{rel}, y_{rel}) を算出することができ、最終的にロボットの絶対位置

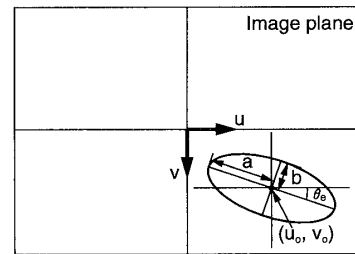


Fig. 9 Parameter of ellipse detection

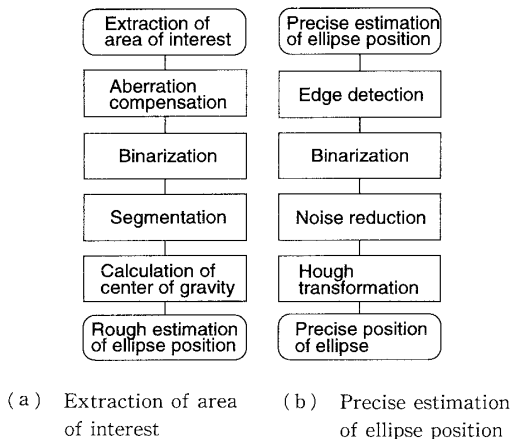


Fig. 8 Flow of marker recognition

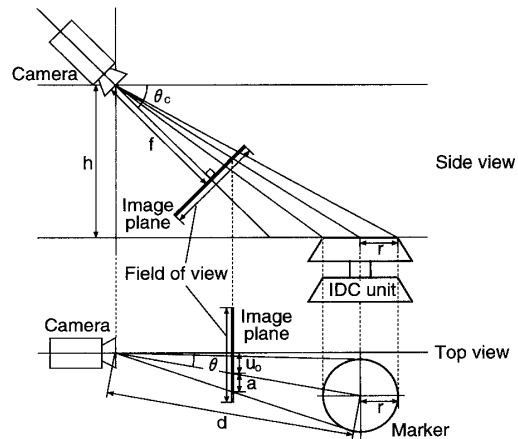


Fig. 10 Relationship between camera and IDC

(x_{rabs}, y_{rabs}) を同定することができる。

5. 自己位置同定実験

5.1 全方向移動ロボット 図 11 に本研究で用いる全方向移動ロボットを示す。このロボットは前後方向、左右方向および回転方向の三つの自由度をそれぞれ別のアクチュエータで独立に駆動することが可能であり、それらの動きを組み合わせることにより自由な方向に移動できる。各アクチュエータにはエンコーダが内蔵されており、その回転数からデッドレコニングを行うことができる。大局的通信デバイスとして無線 LAN を、局所的通信デバイスとして Reader/Writer を搭載することにより、他のロボットおよび環境と情報を交換したり、協調のための交渉をすることが可能である。また、その他のセンシングデバイスとして、周囲の状況を認識するための CCD カメラおよびロボットの姿勢角を測定する地磁気方位センサを搭載している。

5.2 自己位置同定実験 本手法の有効性を示すために、図 11 に示した全方向移動ロボットを用いて自己位置同定の実験を行った。本実験で用いた CCD カメラは IDC ユニットの上面から 625 mm の高さお

よびロボットの中心から前方へ 200 mm の位置でロボットに固定されている。このとき、ロボットの中心から前方 1 000 mm の位置に設置されている IDC ユニットのマーカを画像平面の中心にとらえるためにカメラの仰角 $\theta_c=38 \text{ deg}$ とした。すなわち、 $h=625 \text{ mm}$ 、 $d=800 \text{ mm}$ となる。また、マーカの半径 $r=75 \text{ mm}$ とした。

地磁気方位センサは、環境内の地磁気の乱れの影響を受けやすいので、本実験では、得られた姿勢角に補正を加えることにより、精度の向上を行った。すなわち、実際に動作する環境に合わせてあらかじめ補正値を算出し、それらの値を測定値に加える。これにより、動作する環境が変化した場合にも、その環境に対応することが可能となる。また、地磁気の乱れの動的な変化に対しては、ジャイロなどその環境においてよい精度が得られるデバイスを併用するか、あるいは単独で用いることにより、対応することが可能である。

実験環境を図 12 に示す。ここでは、図中左上の点をスタートおよびゴールとし、各辺が 5.0 m および 3.5 m の長方形を時計回りに 1 周する経路をロボットに与える。本実験で用いた全方向移動ロボットは、回転方向の位置制御に大きな誤差が含まれる傾向があるので、IDC は図のように各頂点から 1.0 m の距離をおいた位置に設置し、ロボットはスタートおよびゴール

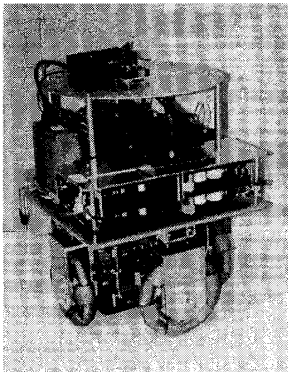


Fig. 11 Omni-directional mobile robot

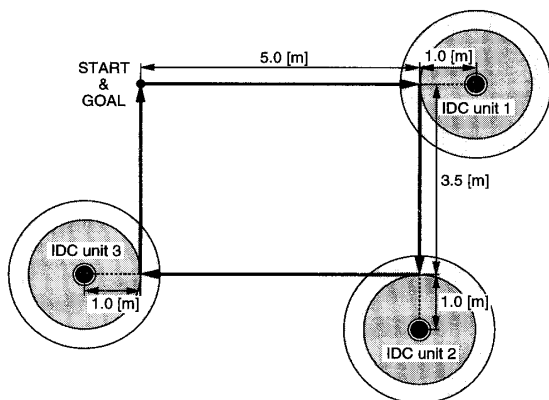
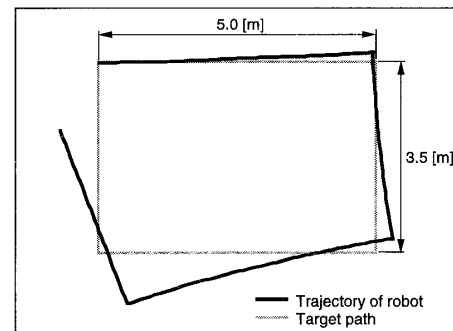
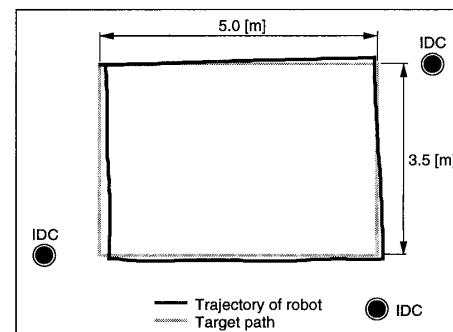


Fig. 12 Experimental environment



(a) Deadreckoning



(b) Proposed method

Fig. 13 Experimental results

地点である頂点を除く三つの頂点で自己位置同定を行う。各 IDC にはそれ自身の位置情報がすでに書き込まれており、ロボットは各頂点で自己位置同定を行った後、右方向に 90 deg 回転し、正面の方向に向かって移動する。

図 13 に、デッドレコニングのみの場合および提案した手法を組合せた場合のロボットの移動軌跡を示す。同図は、ロボットにペンを取付けることにより、床に描かれた軌跡を作図したものであり、実際にロボットが環境内を走行した軌跡を表している。デッドレコニングのみを用いた実験 [図 13(a)] では、その誤差が累積することにより最終的にロボットの位置が目標の経路から大きくずれている。これに対して提案手法を用いた実験 [図 13(b)] では、各頂点で自己位置同定を行い、ロボットの位置情報を補正することによりロボットの位置の誤差を最小限に抑えている。このとき、最終的なロボットの位置と目的地との間の距離は約 96 mm であり、これはロボットの全移動距離の 17 m に対して約 0.5% の誤差である。また、目標経路とのずれの最大距離は 168 mm におさえることができた。以上の結果により、IDC をランドマークとすることにより自己位置同定が有効に行えることを確認した。

6. 結 論

本論文では、知的データキャリア IDC を用いて環境に埋め込んだ情報に基づいたランドマークの位置情報の取得手法および複数のデバイスから得られた情報の統合手法を提案した。また、全方向移動ロボットを用い、実際に自己位置同定実験を行うことによってその有効性を示した。本手法は、自律分散ロボットシステムを想定すると以下のような利点を有する。

- (1) ロボット間の大局的通信の通信量を削減
- (2) ランドマークの位置情報の整合性の考慮が不要
- (3) 環境の変化に対してランドマークの再構築が

可能

- (4) 情報の統合により低コストで必要な情報量を取得

今後は、ロボットが IDC の情報を更新することにより、動的な環境の変化に対応する具体的な手法の検討を行う予定である。

文 献

- (1) 越智達之, 線対称な旋回レーザー光を用いた移動ロボットの位置検出システム, 日本ロボット学会誌, 5-5(1987), 339-342.
- (2) 飯田重喜・坪内孝司・油田信一, 移動ロボットのカラー画像による自己位置同定法, 日本ロボット学会誌, 8-6(1990), 641-651.
- (3) 広瀬武志, 画像処理による無人搬送車の位置と方位の測定, 計測自動制御学会論文集, 27-5(1991), 524-531.
- (4) 福田敏男・伊藤茂則・太田伸之・新井史人・阿部靖則・田中幸悦・田中祥夫, 自律移動ロボットの視覚によるナビゲーションシステム(天井のランドマーク認識による自律移動ロボットのナビゲーションと位置補正実験), 機論, 60-573, C(1994), 1743-1750.
- (5) 春日智恵, デジタルパターンを用いた自己位置同定法, 日本ロボット学会誌, 12-6(1994), 857-862.
- (6) 新井民夫・木村久幸・前田健太郎・太田 順・梅田和昇, 移動ロボット相互の位置・姿勢実時間計測システムの開発, 日本ロボット学会誌, 12-3(1994), 472-478.
- (7) 広瀬茂男・倉爪 亮・長田茂美, 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, 13-6(1995), 838-845.
- (8) 藤田隆則・浅間 一・Thomas, von Numers・琴坂信哉・宮尾 栄・嘉悦早人・遠藤 勲, 群ロボットのための知的データキャリアの開発(第1報)ーデータキャリアの設計と試作ー, 1995年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1995), 491-492.
- (9) 浅間 一・佐藤雅俊・嘉悦早人・尾崎功一・松元明弘・遠藤 勲, 3自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, 14-2(1996), 249-254.
- (10) 佐藤雅俊・松元明弘・後藤伸之・浅間 一・嘉悦早人・遠藤 勲, 複数移動ロボットの相互協調搬送のためのフォークリフト機構の開発, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1995), 647-648.
- (11) 藤井輝夫・浅川雄二・浅間 一・藤田隆則・松元明弘・嘉悦早人・遠藤 勲, 移動ロボットのフォークリフト機構によるインテリジェントデータキャリアの搬送, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'96講演論文集, (1996), 491-492.