

東京工業大学 平成 10 年度 学位論文

協調ポジショニングシステムに関する研究

東京工業大学 機械物理工学専攻

倉爪 亮

目次

第1章 序論	7
1.1 従来の移動ロボットの位置同定手法	7
1.1.1 内界センサによる移動変化量の推定と時間積分	8
1.1.2 外界センサによる外部特徴点の観測と環境地図との照合	8
1.1.3 両者の併用とセンサ融合	9
1.2 協調ポジショニングシステム (CPS)	10
1.3 本論文の構成	11
第2章 協調ポジショニングシステム (CPS)	13
2.1 CPS とは	13
2.2 CPS の定義	15
2.3 CPS の分類	15
2.4 CPS の特徴	17
2.5 CPS の応用分野	18
2.6 CPS における課題	20
2.6.1 CPS の高精度化, 効率化の検討	21
2.6.2 タスクと位置同定の協調	21
2.6.3 位置同定法/システム間の協調	21
2.6.4 外部環境への適応	22
2.7 今後の展開	22
2.8 第一次機械モデル CPS-I による測定実験	22
2.8.1 移動ロボットの構成と測定メカニズム	22
2.8.2 移動測定実験	25
2.9 まとめ	26
第3章 誤差伝播の基本方程式	29
3.1 誤差分散行列による同定精度の評価	29
3.2 位置同定精度の計算例	32
3.3 まとめ	33
第4章 多数台ロボットの観測による冗長位置情報の融合	37
4.1 第二次 CPS 機械モデル (CPS-II)	37
4.2 レーザ距離計測装置の計測誤差特性	38
4.3 冗長位置情報の融合手法	41
4.4 デッドレコニング法との比較実験	46
4.5 冗長位置情報の融合実験	47

4.6	まとめ	47
第5章	最適化移動形態の検討	55
5.1	第三次機械モデル CPS-III	55
5.2	CPS-III の最適化移動形態	56
5.2.1	前提条件	56
5.2.2	シミュレーション解析	57
5.3	各最適化移動形態における誤差解析解の導出	58
5.3.1	各最適化移動形態の誤差解析解	59
5.3.2	各最適化移動形態の誤差発生メカニズム	60
5.4	最適化移動形態の検証実験	64
5.4.1	屋外長距離移動測定実験	64
5.4.2	最適化移動形態の検証実験	65
5.5	まとめ	66
第6章	CPS の応用例	69
6.1	CPS アクティブタッチ融合型環境地図作成法	69
6.1.1	CPS アクティブタッチ融合型地図生成法の提案	70
6.1.2	メカニカル壁面追従を行うアクティブタッチ機構	71
6.1.3	CPS アクティブタッチ融合型環境地図作成システム	74
6.1.4	アクティブタッチ機構の動作確認実験	75
6.1.5	屋内環境地図の作成実験	76
6.1.6	まとめ	77
6.2	CPS 誘導型床面自動清掃作業システムの構築	81
6.2.1	CPS 誘導型床面自動清掃ロボットシステムの構成	81
6.2.2	清掃ロボット ACRO-V	81
6.2.3	レーザ式コーナーキューブ追尾機構	84
6.2.4	CPS ロボットによる清掃ロボットの誘導	85
6.2.5	床面掃引作業実験	87
6.2.6	まとめ	89
第7章	結論	91
付録A	各基本移動形態に対する誤差解析解の導出	93
A.1	基本移動形態 A,B の誤差解析解	93
A.2	基本移動形態 C の誤差解析解	94
付録B	偶然誤差と系統誤差	95
B.1	従来の誤差解析法の問題点	95
B.2	誤差の性質	96
B.3	線形計画法を用いた誤差解析法の提案	97

目 次

2.1	Positioning principle of type 1	14
2.2	Positioning principle of type 2	14
2.3	Positioning principle of type 3	16
2.4	Three axes on CPS	16
2.5	Floor cleaning robot system	18
2.6	Multiple planetary robers	19
2.7	Multiple planetary rovers “Gunryu”	20
2.8	Exploration in a cave	20
2.9	Construction of the sensor system.	23
2.10	Appearance of the mobile robots.	24
2.11	Appearance of the sensor system.	24
2.12	Basic movement of CPS-I	26
2.13	An example of experimental results.	27
3.1	Example of position calculation for CPS-I.	30
3.2	Triangle chain pattern A	32
3.3	Triangle chain pattern B	33
3.4	Error ellipses shown at each robot positions	34
3.5	The error variance in estimated position with different representative angles	35
4.1	Basic principle of CPS-II	38
4.2	Total view of the mechanical model CPS-II.	39
4.3	The parent robot of CPS-II.	40
4.4	The child robot of CPS-II.	40
4.5	Distance measurement errors	41
4.6	Measured distances, azimuth, and elevation angles	49
4.7	Distribution of measured distances and angles	50
4.8	Distribution of measured distances and angles	51
4.9	Example of position calculation.	52
4.10	An example of the experimental results with 3 robots.	52
4.11	Example of measurement experiments.	53
4.12	An example of the experimental results with 4 robots.	53
4.13	Moving strategy in each measurement cycle.	54
5.1	Parent robot of CPS-III	55
5.2	Child robot of CPS-III	56

5.3	Simulation model.	57
5.4	Optimum moving configurations.	58
5.5	Definition of moving parameters	59
5.6	Values of error variances for optimum moving strategies A and B	60
5.7	Values of error variances for optimum moving strategy C	61
5.8	Variation of positioning error of basic moving strategies A,B, and C.	62
5.9	Experiment of log distance measurement.	64
5.10	Experiments of long distance movements on even surfaces	65
5.11	Experiments of long distance movements on uneven surfaces	65
5.12	Moving strategie D for experiments.	66
5.13	Experiments for optimum moving strategies	67
6.1	Concept of map creation by CPS based active touch	72
6.2	Active touch mechanism	73
6.3	Basic principle of wall following behavior	73
6.4	Passing concave corner	74
6.5	Passing convex corner	74
6.6	Escape from dead end	75
6.7	Child robot with active touch mechanism	75
6.8	Experiment of wall-following motion	76
6.9	Environment for experiments	77
6.10	Desired paths for wall-following robot	78
6.11	Experiment of map creation	79
6.12	Paths of wall-following robot and parent robot measured by CPS	79
6.13	Moving paths of parent and child robots	80
6.14	Acquired contour of rooms	80
6.15	Total view of the automatic cleaning robot system with CPS-III and ACRO-V.	82
6.16	ACRO-V (Automatic Cleaning RObot using the Vuton architecture)	82
6.17	Omni-directional mobile robot, Vuton [18].	83
6.18	Coordinates of vuton for the analysis.	83
6.19	System for auto-detection and tracking of corner cubes.	84
6.20	Total view of auto-detection and tracking system.	85
6.21	Direction toward a corner cube.	86
6.22	Path of ACRO-V with and without CPS.	88
6.23	Path of the CPS robots.	89
B.1	Random and systematic errors	96
B.2	Comparison between random and systematic errors	96
B.3	Example of positioning errors	98

表 目 次

2.1	Specifications of the system.	25
3.1	Minimum error variance for each triangle chains	34
4.1	Specifications of a range finder.	39
4.2	Averages and standard deviations of the laser range finder	41
4.3	Positioning and attitude accuracy of CPS-II after robot 0 moves with the distance of 21.5m	46
4.4	Positioning and attitude accuracy of CPS-II with 3 and 4 robots for the motion of Fig. 4.12 . Positioning error ratios are also shown.	47
5.1	Optimum robots configurations.	58
5.2	Optimum robots configurations in case that two moving patterns are repeated.	59
5.3	Optimum configurations of moving strategies A and B.	60
5.4	Optimum configurations of moving strategie C.	60
5.5	Experimental results of long ditance movements on even surfaces	64
5.6	Experimental results of long ditance movements on uneven surfaces	66
5.7	Positioning accuracy for optimam moving strategies.	67
6.1	Errors of the obtained environmental map	77
6.2	Specifications of the auto-detection and tracking system.	84

第1章 序論

惑星探査ロボットや無人搬送システム，あるいは自動清掃ロボットなど，脚や車輪などの移動機構を有し，自らの知識判断に基づいた自律走行が可能な移動ロボットによる自動移動作業システムは，環境認識／行動制御アルゴリズムや搭載機器の高度化，高性能化とともに，ロボットの新たな応用分野として今後ますます重要になるものと考えられる．この自動移動作業システムにおいて，移動ロボットが移動中，あるいは移動後の自己位置姿勢をできる限り正確に同定する機能は，効率的かつ確実な作業遂行を実現する上で最も基本的かつ重要な機能の一つである．今日，地表面上では複数衛星からの基準信号の到着時刻差から三次元位置を同定するGPS(Global Positioning System)が整備されつつあり，屋外環境で使用する移動ロボットに対しては，GPSによる位置同定が今後は主流になるものと考えられる．このため，GPSによるロボットの誘導に関する研究も多い[1],[2],[3],[4],[5],[6]が，GPSにはi)現在のところ単独では同定精度が低い(民生用で100m, DGPSで3m[7])，ii)ビル内部や地中など基準信号が到達困難な環境では利用できない，などの問題が存在し，ロボット周囲の局所的な情報のみを用いて正確な位置同定を実施できるシステムの確立が依然として求められている．

そこで本章ではまず従来提案されてきた移動ロボットの位置同定手法について概説し，それらの基本原理と特徴，問題点を明らかにする．次にそれらの問題点を解決しうる新たな移動ロボットの位置同定手法として，「協調ポジショニング法，Cooperative Positioning System, CPS」を提案する．本手法は複数のロボットが協調的に行動して初めて発現する群・集団としての機能を，特に位置同定に利用することにより，従来手法では困難であった未知／不整地／三次元屋外環境での高精度な位置同定を可能にするものである．

さて，本手法のように複数ロボットを協調して制御する，いわゆる群ロボットの研究は近年盛んに行なわれている[96],[97],[98],[99],[100],[101],[102],[103]．しかしその多くは，単体のロボットでも基本的に実現可能であるが，作業効率や柔軟性，適応性，耐故障性などから群ロボットの優位性を主張したものや，作業対象や使用目的を明確にせず，ある制約条件下における群行動の基本特性を調べたものなどであり，群ロボットを利用する必然性についての議論があまりなされていない．一方，本論文で提案するCPSは，ロボット単独では実現不可能であるが，それが群形態を有して初めて実現されるものであることから，これまでの群ロボットの研究とは一線を画すものであると著者らは考えている．

1.1 従来の移動ロボットの位置同定手法

移動ロボットの位置同定法は，これまでに様々なものが提案されているが，それらは大きく次の3つの手法に分類できる．

1. 内界センサによる移動変化量の推定と時間積分

2. 外界センサによる外部特徴点の観測と地図照合

3. 1, 2 の併用とセンサ融合

以下では、それぞれの手法について概説する。

1.1.1 内界センサによる移動変化量の推定と時間積分

この手法は、エンコーダや光ファイバジャイロ、振動ジャイロ、加速度センサ等の内界センサにより基準時間内の移動変化量を推定し、それを時間積分することにより、初期位置からの総移動量を計算するものであり、一般に Odometry, あるいは Dead Reckoning 法と呼ばれる。この最も代表的な手法は、車輪型移動ロボットに対して、基準時間内の車輪の回転角度変化量をエンコーダ等により測定してロボットの瞬時並進速度、角速度を求め、それをサンプリング間隔を考慮して加え合わせることで現在位置を推定するものである。この手法は一般に機構が簡単で実現しやすく、また整地された二次元環境では比較的良好な同定精度が得られるが、接地面と車輪との滑り、接地面の凹凸による道のり誤差、エンコーダや演算時に生じる量子化誤差、丸め誤差、接地圧変化による車輪径や車輪間隔の変化など様々な誤差要因が存在し、また生じた誤差を補正する手段がないため、移動とともに誤差が蓄積するという問題がある。さらに、高さ方向の変化量の推定は原理的に不可能であるため、凹凸の存在する三次元環境では使用できない。これらの問題から本手法の一般的な同定精度は、平坦水平面上で移動距離の約 10% 程度であり、さらに外部環境に対して移動後の絶対位置を推定するためには、移動開始時の初期位置姿勢が正確に測定されなければならない。

そこで Fuke ら [52] は、ルナローバの位置同定手法として、エンコーダから得られる車輪回転角度の以外に、加速度センサ、振動ジャイロにより本体に加わるコリオリ力等を計測し、カルマンフィルタでそれらを融合することで測定精度を向上させる手法を提案した。また Borenstein ら [44] は、段差乗り越えなどによって生じる急激な本体角速度の変化を振動ジャイロで測定し、エンコーダから得られる本体角速度との差が大きい場合には振動ジャイロの情報をエンコーダの代わりに用いる手法を示した。しかし Fuke らの実験で示されているように、これら他の内界センサを用いても、車輪-地面間の状態に応じて変化する滑り量などの同定誤差を完全に補償するのは困難である。またエンコーダ以外の内界センサを複数組み合わせる手法も提案されており、例えば Barshan ら [30] は、振動ジャイロと加速度センサ、チルトセンサを組み合わせ、温度ドリフトの補正等も考慮した拡張カルマンフィルタにより位置同定を行なう手法を提案している。しかし特に加速度センサの測定誤差が大きく、並進位置精度は非常に低いことが報告されている。

1.1.2 外界センサによる外部特徴点の観測と環境地図との照合

この手法は CCD カメラや超音波センサ（ソナー）、レーザレンジファインダ等の外界センサを用いて外部環境内の特徴点（ランドマーク）を観測し、ロボットの保持していた環境地図と照合して自己位置を同定するものである。この手法には、光ビーコン [53],[47] やレーザ反射材 [59]、特殊な形状の目印 [41]、磁気テープなど既知の目標物を予め走行経路に設置する手法や、建物屋根 [31] や蛍光灯など一般的に存在する人工構造物をランドマー

クとする手法、あるいはDEM(Digital Elevation Map) が与えられた火星などの惑星表面において、山の稜線形状から現在位置を同定する手法など、自然物体をランドマークとした研究も多く提案されている。またGPS[4],[5],[6],[8],[7] や太陽センサ[48] を用いた手法も本手法に含まれる。

本手法に関連し、Sugihara [22], Krotokov [55], Atiya [39] は、環境地図を有するロボットがある位置で複数のランドマークの方向を観測したとき、環境地図上のランドマークと観測されたランドマークを対応づけ、現在位置を推定する手法を提案している。またBetke [141] らも、すでに対応付けが行なわれているランドマークに対し、複素数表現を用いることで効率的な自己位置計算を行なう手法を提案している。またMatthies [26] は、誤差を含むステレオ画像からエッジを抽出し、移動前後でそれらに対応づけることで瞬時移動量を計算する手法、及びカルマンフィルタにより位置同定誤差を減少させる手法を提案している。またTalluri ら [31] は、ビルなど人工構造物の屋根の形状を用いて位置を同定する手法を提案している。彼らはこのなかでランドマーク対応づけの計算量増加を防ぐため、まず環境をEdge Visibility Region と呼ぶ特定の屋根エッジが視認可能な小領域に分け、これを用いて大まかな位置同定を行なった後に、繰り返し計算を用いた正確な位置決めを行なっている。さらにTalluri ら [38] は、広い領域の起伏形状を表すDEM (Digital Elevation Map) からその2次元画面上への投影状態であるHLC (Horizon Line Contour) を計算し、初期位置が与えられない場合でもカメラ画像から得られる稜線の高度とHLCの比較から現在位置を同定する手法を提案している。ただし本手法ではコンパスと高度計が必要である。

これら外界センサを用いた手法は、外部不動点を用いるためロボット自身の運動履歴に直接影響を受けず、精密な観測を行えば高精度な位置同定が可能であるが、ランドマークの位置形状を記した環境地図が予め与えられなければならないため、未知環境では使用できないという問題がある。

また観測し位置を計測し終えた環境地図上の特徴点を新たなランドマークとし、それを基準として自己位置同定を繰り返すOdometry的な手法も考えられる。久保田ら[9]は惑星探査ロボットの自己位置同定問題に対して、レーザレンジファインダにより3つの地形特徴点を抽出し、移動前後でそれらを観測することで自己位置を同定する手法を示している。Sutherland ら [29] は、屋外移動ロボットが周囲の山の頂上などをランドマークとして位置同定を行なう場合に対して、移動誤差を最小化する適切なランドマークの選択手法を示した。

この手法は環境地図の作成と位置同定を同時に行うため、未知環境でも使用可能であるが、デッドレコニング法と同様に同定誤差が移動とともに蓄積するため、各々のランドマークの位置同定をできる限り正確に行う必要がある。しかし一般の環境の特徴点をランドマークとする限り、視点の移動によるアスペクトの変化などにより、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く、やはり誤差が蓄積しやすいという問題がある。

1.1.3 両者の併用とセンサ融合

デッドレコニングは測定原理が簡単で少ない計算量で実現でき、従ってサンプリング周波数を大きくすることができるが、前述のように同定精度が低く、測定とともに誤差が蓄積する問題がある。一方、外界センサを用いた手法は一般に処理が複雑で計算に時間がかかるが、比較的高い同定精度が得られ、しかも同定誤差は移動距離に影響を受けない。そ

ここで通常はデッドレコニングによる位置同定を行い、周期的に外界センサにより外部環境を測定し、累積誤差を補正する手法が考えられる。この最も一般的な手法は、ロボットの自己位置を状態変数としたカルマンフィルタを構成し、両者の推定位置を誤差分散に応じて融合するものである。

Kriegman ら [33] は、複数位置でのステレオ画像から得られる同一のランドマークの観測情報と、車輪回転角によるデッドレコニングの位置情報をカルマンフィルタで融合することで、ランドマークの観測情報とロボットの位置情報の両者の不確実性を同時に減少させる手法と示した。また Crowley [49] は、超音波センサによる環境地図の自動作成、及び作成された地図と観測情報の比較によりデッドレコニングによる位置同定を修正する手法を提案した。さらに Nishizawa ら [59] は、外部に置かれたリフレクタの方位をロボットに搭載したレーザにより測定し、カルマンフィルタによりデッドレコニングと融合した。これ以外にも誤差のガウス性を仮定しない手法 [54] や、外界センサの観測に時間遅れがあり、観測データを収集した位置と認識処理が終了し観測結果が得られた位置に差がある場合に対して、時刻を遡って位置を補正する手法 [10] など提案されている。

本手法はデッドレコニング法で生じた誤差を絶対位置計測により補正できるため、不整地においても高い同定精度が得られる可能性があるが、外界センサによる補正はそのセンサの測定精度に大きく依存し、正確な位置同定のためには、外界センサによる測定対象物が既知である必要がある。

1.2 協調ポジショニングシステム (CPS)

1.1.2 で示した環境地図の作成と位置同定を同時に行う方法では、いかに外部環境の位置形状の不変なランドマークを選択し、そのランドマークの位置を高精度に計測するか、また移動前後で同じランドマークを抽出し、それぞれ対応付けを行うかが問題となる。

一方、このランドマークを環境に初めから存在するものではなく、位置同定を行うロボットの側で予め用意し、しかもそのランドマークが移動ロボットとともに自由に移動・静止可能であるシステムを考える。この場合、ランドマークの機能特性は既知であり、後述するレーザレンジファインダ／コーナキューブ等の専用測距、測角機器を用いれば、自然環境内のランドマークを用いるより遥かに高精度な計測が可能である。さらに各ランドマークをそれぞれ識別可能であるように構成すれば、移動前後でのランドマークの対応も容易である。

そこで本論文では、これら移動可能なランドマークとして複数の移動ロボットを導入する手法を「協調ポジショニング法 Cooperative Positioning System, CPS」を定義し、その基本特性と実現可能性を明らかにすることを目的とする。本手法は複数台のロボットからなるロボット群を1つのセンサシステムとみなし、各ロボットが他のロボットの位置同定におけるランドマークとしての役割を相互に演じることにより、ロボット群内の内部局所的情報のみを用いて未知／不整地環境における高精度な位置同定を実現しようというものである。本手法は自律的な作業移動ロボットを実現する上で他の手法では置換しがたい能力を有し、我々は実用化を目指した研究を今後継続して行なっていく予定であるが、本論文ではこれまで我々が行ってきた理論的、実験的検討を整理し、本手法の有用性、応用可能性を検討し、今後の研究の方向付けを行う。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下ようになる。

第1章「緒論」では、従来提案されてきた移動ロボットの位置同定手法について概説し、それらの基本原理と特徴、問題点を明らかにする。次にそれらの問題点を解決しうる新たな移動ロボットの位置同定手法として、「協調ポジショニング法, Cooperative Positioning System, CPS」を提案する。本手法は複数のロボットが協調的に行動して初めて発現する群・集団としての機能を、特に位置同定に利用することにより、従来手法では困難であった未知／不整地／三次元屋外環境での高精度な位置同定を可能にするものである。

次に第2章「協調ポジショニングシステム (CPS)」では、提案するCPSの定義と基本構成、応用分野等について検討し、今後CPSを実用化するために解決すべき課題を明らかにする。またCPSの工学的な実現可能性を検証するため、第一次CPS機械モデルCPS-Iを試作し移動測定実験を行った結果を示し、CPSはデッドレコニングに比べて高い位置同定精度が得られることを確認する。

次に第3章「誤差伝播の基本方程式」では、CPSを実用化する上で重要な問題である位置同定誤差について検討し、ロボット間の相対角度や相対距離の測定誤差がガウス分布に従うと仮定して、移動とともに蓄積する位置同定誤差の定量的な評価を可能にする、CPSに対する誤差伝播の基本方程式を導出する。また代表的な2種類の移動形態に対して、これらの基本方程式を用いた移動後の位置同定誤差の計算例を示す。

次に第4章「多数台ロボットの観測による冗長位置情報の融合」では、大規模惑星探査システムなど、多くの台数のロボットを用いたシステムへのCPSの適用を考え、1つの同定位置に対して複数の位置情報が得られた場合に、各位置情報の精度に応じてそれらを適切に融合する、重みつき最小自乗法を用いた誤差解析手法を誘導する。この手法は第3章で示した誤差伝播の基本方程式を拡張したものであり、これにより冗長な観測情報の融合と累積誤差の評価を系統的に実施可能である。さらに提案した手法の有効性を、4台の移動ロボットからなる第二次CPS機械モデルCPS-IIを用いた移動測定実験により検討する。

第5章「最適化移動形態の検討」では、CPSを応用する際に重要となる、「各ロボットをどのような移動パターンで動かしていくべきか」という問題に対し、移動後の同定誤差の最小化を目的とした最適化移動形態を提案する。これは、CPSにおける計測誤差の累積は各ロボットの移動形態や運動履歴によって大きく変化することから、ロボットの移動形態と移動後の累積誤差の関係を計算機シミュレーション及び解析的手法により検討し、移動誤差を最小化する3種類の最適化移動形態を求めたものである。また第三次CPS機械モデルCPS-IIIを用いた屋外環境における精度測定実験を行い、提案した最適化移動形態により他の移動形態に比べて高い位置同定精度が得られることを確認する。

さらに第6章「CPSの応用例」では、CPSの具体的な2つの応用例を示し、作業実験を通してCPSを実用化する際の問題点や解決すべき課題を明らかにする。第一の例は「CPSアクティブタッチ融合型地図生成法」である。これは移動ロボットが自律的かつ効率的に作業を行うため必要不可欠な外部環境の地図情報を、移動ロボットにより自動的に獲得させる手法であり、移動ロボット自身の位置同定にはCPSを、また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”方式を用いるものである。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、センサを用いずメカニカル壁面追従を実現するアクティブタッチ機構を提案し、試作した機械モデルの概要と屋内環境における環境地図の作成実験の様子を紹介する。

また第二の例は、地下街や駅構内などの清掃作業において、正確な床面掃引作業を自動的に行う「床面自動清掃作業システム」である。このシステムの実現には正確な位置同定技術が必要不可欠であるが、現在までに提案されたシステムはデッドレコニングや光ファイバジャイロ、超音波センサなどにより自己位置を推定しているため、例えば絨毯上や濡れた床面で生じる車輪の横ずれやスリップ量の補正、複数センサ情報の組み合わせによるセンサオフセット変動の補正など、正確な位置同定のためには多くの複雑で困難な処理が必要であったさらにロボットが走行中に障害物と衝突してその方位がずれる場合には、その出力に大きな誤差を生じることから、未知の障害物が数多く存在すると予想される環境での自律的な掃引清掃作業で用いるのは非現実的と考えられていた。そこでこの問題にCPSを導入することで、床面の特性や周囲環境の情報が得られない場合や、作業中に障害物と衝突した場合でも正確な掃引作業が可能となる、「CPS 誘導型床面自動清掃作業システム」を提案し、試作した床面自動清掃ロボット ACRO-V (Automatic Cleaning RObot using the Vuton architecture) と第三次機械モデル CPS-III を用いて、屋内環境において掃引作業実験を行った結果を紹介する。

最後に第7章「結論」で、本研究によって得られた知見をまとめ、本研究の結論を述べる。

第2章 協調ポジショニングシステム (CPS)

本章では、まず我々の提案する「協調ポジショニングシステム (CPS)」の定義と基本構成、応用分野等について検討し、今後 CPS を実用化するために解決すべき課題を明らかにする。また CPS の工学的な実現可能性を検証するため、第一次 CPS 機械モデル CPS-I を試作し移動測定実験を行った結果を報告する。

2.1 CPS とは

「協調ポジショニングシステム (CPS)」とは、狭義には単独では自己位置の同定が困難な複数の移動ロボットを協調的に動作させ、個々の有する位置、観測情報を互いに交換し合うことにより、移動ロボット群全体として高精度な位置同定を行おうというものである。しかし CPS はこれに留まらず、高精度あるいは効率的な位置同定を実現するためのロボット間の協調制御問題、さらには群ロボットシステムにおける移動、位置同定と作業の最適配分問題なども含む、ロボットの作業／移動における協調問題全般に関わる幅広い概念である。

まず CPS の基本的概念を理解するために、Figs. 2.1, 2.2 に CPS により実際に位置同定を行っている様子を示す。Fig. 2.1 の例は 2 台のロボットを使用するものである。静止ロボット 1 の位置 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ が既知であるとしたとき、CPS は以下のように実現される。まず実線の矢印のように移動してきて停止したロボット 2 に対し、ロボット 1 がロボット相互間の距離 r 、重力方向垂直軸回りの角度 θ 、さらに水平面からの仰角 ϕ を計測し、その 3 次元位置 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ を以下の式により同定する。

$$x_2 = x_1 + r \cos \theta \cos \phi \quad (2.1)$$

$$y_2 = y_1 + r \sin \theta \cos \phi \quad (2.2)$$

$$z_2 = z_1 + r \sin \phi \quad (2.3)$$

この計測の後、今度はロボット 1 が破線の矢印のように移動し、その位置をロボット 2 から計測するという動作を繰り返す。

Fig. 2.2 は 3 台のロボットを使用するものである。ロボット 1 およびロボット 2 の位置 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$ が既知であるとき、まず実線の矢印のように移動し停止したロボット 3 の位置 $P_3(x_3, y_3, z_3)$ を、ロボット 1 およびロボット 2 からロボット 3 への方位角 θ_1, θ_2 と、仰角 ϕ_1, ϕ_2 を計測することにより以下の式から求める。

$$x_3 = \frac{x_1 \tan \theta_1 - x_2 \tan \theta_2 + (y_2 - y_1) \tan \theta_1 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} \quad (2.4)$$

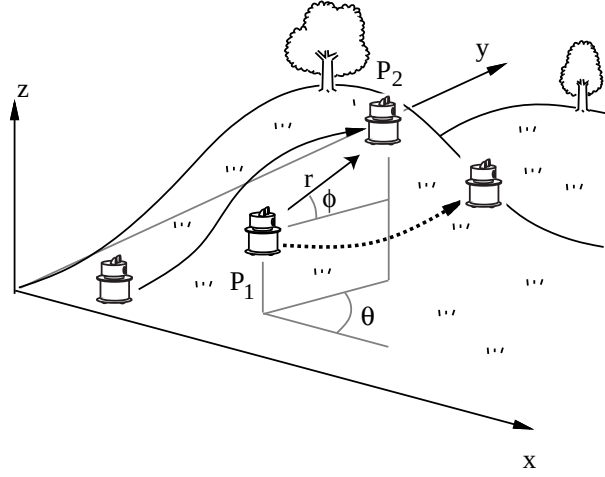


Figure 2.1: Positioning principle of type 1

$$y_3 = \frac{-(x_2 - x_1) \tan \theta_1 \tan \theta_2 + y_1 \tan \theta_1 - y_2 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} z_3 &= z_1 + \frac{\tan \theta_2}{\cos \theta_1 (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \tan \phi_1 \\ &= z_2 + \frac{\tan \theta_1}{\cos \theta_2 (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \tan \phi_2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

その後、例えばロボット 1 を破線の矢印のように移動させ、ロボット 2 と 3 からその位置を計測するという動作を繰り返す。

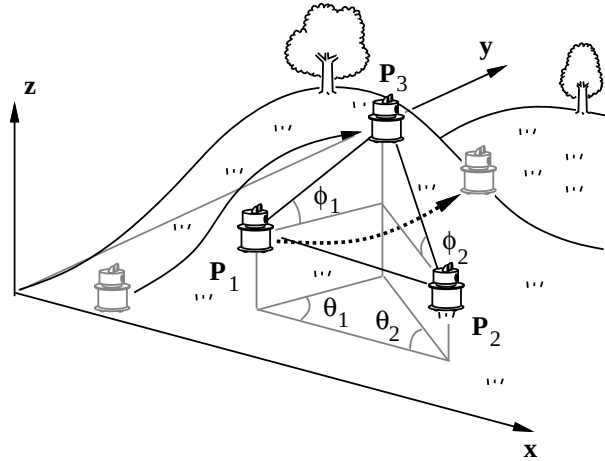


Figure 2.2: Positioning principle of type 2

これら上述した例は静止ロボット群の観測を基本とした CPS であり、CPS の基本動作は以下のように記述できる。まず群ロボットを 2 つのグループ A,B に分け、

1. 初期位置を計測してあるロボット群 A を静止させ、ロボット群 B を適当な距離移動させる。ロボット群 B の移動時の位置同定は、ロボット群 A との相対位置の観測や内界センサによって行う。
2. 次にロボット群 B を停止させ、その位置をロボット群 A を基準にして正確に計測する。
3. その後今度は静止ロボット群を B、移動ロボット群を A として 1~2 の動作を行ない、これをロボット群が目標位置に到達するまで繰り返す。

2.2 CPS の定義

上述の例のように、我々は以下の条件を満たす位置同定法を協調ポジショニングシステム (CPS) と定義し、GPS やデッドレコニング法などの他の位置同定法と明確に区別する。

1. 位置同定を行なう移動ロボット (あるいはロボット群) が用意し設置した静止ロボット、あるいは静止ランドマークを用いる。
2. 位置同定を行なう移動ロボットは周囲の静止ロボット、あるいは静止ランドマークを観測し、その位置情報を利用して自己位置、速度を同定する。

これらの条件を満たすものであれば、CPS は上述した例に限定されるものではなく、他にも多くの構成が可能である。例えば、**Fig. 2.2** と同様に 2 台の静止ロボットから 1 台のロボットの位置同定をする場合でも、方位角 θ と仰角 ϕ の組み合わせではなく、ロボット間の距離 r と仰角 ϕ の組み合わせを計測する CPS も考えられる。また、ロボット群を 2 グループに分けるのではなく、グループの中から循環的に静止ロボットを選択し、全体的により連続的に移動していく CPS もある。さらに、多くの台数のロボットからの冗長な計測情報を基にして、より正確な位置同定を行う CPS なども考えられる。また観測を行なう親ロボットとランドマークとしての役割しか演じない子ロボットからなる親子ロボットシステム、あるいは CPS を行なうロボットだけでなく、作業の効率化のために常に CPS ロボットを観測し移動を継続する作業ロボットを伴走させるシステムなども考えられる。

また前項で示した例は、全てのロボットが交互に静止ランドマークとなる方式であるが、CPS は **Fig. 2.3** に示すように移動ロボットが固定ランドマークを搬送していき、次々と設置する方法によっても実現可能である。これは子ロボット 1 および 2 が親ロボットの観測による大まかな位置同定を行ないながら自由に移動し、適当な場所で静止ランドマーク 1,2 を設置する。親ロボットはこれら静止ランドマークを観測し、移動、静止を繰り返しながら各ランドマークの位置、および自己位置を正確に同定する。一方、子ロボットを全く利用せず、一台のロボットがランドマークを次々に外部へ射出し、そのランドマークの位置同定とそれらを用いたロボット自身の位置同定を連続して行なうシステムも考えられる。

2.3 CPS の分類

CPS にはこれまでに示したように様々な構成が考えられるが、これらは大きく次の 3 つの基本軸で分類できる (**Fig. 2.4**)。

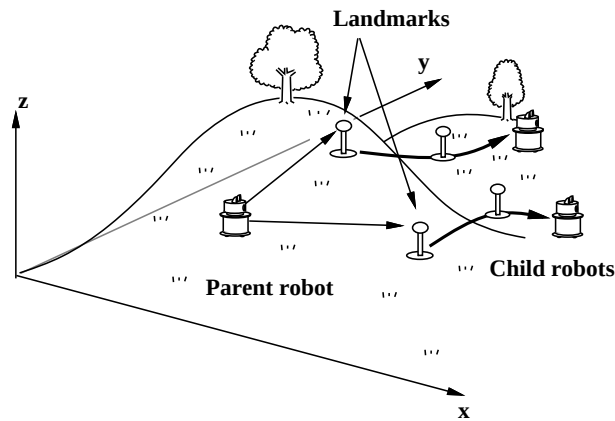


Figure 2.3: Positioning principle of type 3

1. CPS を具体的に実現する機構、センサ，通信手段による分類 (Mechanism)
2. ロボット台数や種類、役割分担による分類 (Control)
3. CPS の運用目的による分類 (Purpose)

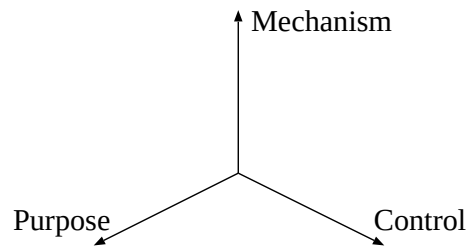


Figure 2.4: Three axes on CPS

第一軸は、例えば具体的な測定原理による分類である。CPS は測量学の知見から以下のいずれかの手法により実現可能である。

1. 相対角度測定を基本とする三角測量法
2. 相対距離測定を基本とする三辺測量法
3. 方位角と相対距離測定を基本とするトラバース測量法
4. 上記の手法を複合的に利用する方法

後述する機械モデル CPS-I では (1) の三角測量法を基本とし、CPS-II, CPS-III ではレーザーレンジファインダの測距精度が非常に高いことから、(3) のトラバース測量法を用いている。このように CPS 利用の際には、これらの手法を実際の要求精度や CPS の利用環境によって適切に選択しなければならない。

第二軸は、運用するロボットの台数、種類、構成、あるいは制御手法による分類であり、例えばロボット群の構成台数から

1. CPS を実現しうる最小システム
2. 冗長なロボットを導入し、同定精度、信頼性の向上を図ったシステム

などが考えられる。また

1. 同じ機能を有する同種のロボットを複数用い、同じ手順をロボットを変えて繰り返すシステム
2. センサを搭載した親ロボットと、ランドマークとしての役割しか演じない子ロボットからなる親子システムなど、異種のロボットを用いるシステム

など、個々のロボットの種類、役割による CPS の分類も考えられる。

第三軸は、CPS の運用目的による分類である。例えば CPS の利用目的として、

1. 高い精度を維持しながら移動を継続することを目的とする
2. 移動とともに実施する作業に対する性能向上を第一義に考え、CPS をその補助的役割として利用する

とした場合、その制御法は全く異なるものとなる。

このように CPS は上述した 3 軸それぞれに対して様々な分類が可能であり、CPS を実現する際には個々の要求仕様に対してまず適切な CPS の測定原理を選択し、次に例えば同定精度や効率、信頼性などを評価基準とした最適なロボット台数や移動形態、あるいは通信プロトコルや通信路の構成法などを検討する必要がある。

2.4 CPS の特徴

このような CPS による位置同定の特長は以下の通りである。

1. 位置計測を積み重ねて位置同定をするためデッドレコニング方式と同様な誤差の蓄積があるが、位置および姿勢の計測が静止地点間でいわば測量的に精密に実施できるため、デッドレコニング方式に比較し桁違いに高い位置同定精度を発揮できる可能性を有する。
2. ランドマーク方式のようにあらかじめ環境にランドマークを設置する必要がなく、未知環境での移動、GPS の使用できない地下街などでも利用できる。
3. 高さ方向の角度や距離を計測することにより、デッドレコニング方式では不可能であった三次元的な位置同定も可能である。

一方、短所として考えられる問題点は、

1. 複数のロボットが必要である。

2. 精密な観測を行なうためには現状ではロボットが静止する必要がある、全体としての移動速度が上げられない。
3. 精度の良い測量機器（これには自分の重力場に対する姿勢を計測する機機も含む）をロボットごとに搭載しておく必要がある。

などが挙げられよう。ただし、(1)と(2)の問題点はもともと複数のロボットを使用することを前提とし、移動速度もそれほど必要とされない応用分野を想定するのであれば障害とはならない。(3)の問題点は、現在測量機器の技術革新が急速に進みつつあるため、近い将来には解決されると筆者らは考えている。筆者らが試作した第一～三次機械モデルの性能については後述する。

2.5 CPS の応用分野

CPS は上述したような特徴を有するため、応用分野をうまく選定すれば有効に利用できるものと思われる。想定される3つの例を以下に挙げる。

第1の例は、Fig. 2.5 に示すような駅構内や地下街などでの**自動清掃ロボット**の制御システムへの応用である。このような清掃ロボットは、あらかじめ記憶した地図に従って広



Figure 2.5: Floor cleaning robot system

い領域を清掃しなければならないが、車輪の回転に基づくデッドレコニング方式では、滑りやすい床面でのスリップによる移動計測誤差が大きく、また壁や柱などに清掃ロボットが衝突した時大きな方位計測誤差を生じやすいという問題を残している。また階段を上下し、平面でない床面の清掃を行う清掃ロボットを考える場合には、三次元計測が不可能なデッドレコニング方式は不適當である。ランドマーク方式も、あらかじめランドマークを設置できない環境が多くあり有効でない。さらに屋外では著しく有効なGPSは、清掃を必要とするような屋内では利用できない。

しかしCPSの利用は効果的である。このような環境での清掃では、複数の清掃ロボットを使用することは想定できるため、ロボット毎に測量装置を装備するだけでCPSが使用可能である。そのため、i) ロボット群Aを静止させて灯台とし他のロボット群Bを通路を清掃しながら移動させる。ii) 適当な距離作業した後ロボット群Bを静止させ、その位置をロボット群Aから精密に計測する。iii) その後、ロボット群Aの方に移動清掃を行わせる、

というような作業を繰り返せば広い領域を正確に位置同定しながら清掃できることになる。あるいはCPSの短所として前項の(3)で指摘したように、全てのロボットの位置をCPSを用いて正確に同定するのが作業時間や効率から困難である場合には、CPSによる正確な位置同定を行なう位置同定専用ロボット群とそれら位置同定専用ロボットに搭載されたマーカ光源等を観測して大まかな位置同定を行ない、清掃作業を静止することなく継続して実行する作業ロボット群からなるシステムも考えられる。特に注目すべき点は、清掃ロボットが作業中どのような外乱を受けようとも、CPSでは位置同定精度に影響がないことである。著者らが構築した床面自動清掃システムの詳細は第6章で示す。なお、各清掃ロボットにはマーカ光源のみを搭載し、それと別個に各清掃ロボットのマーカ光源までの距離と角度を計測するセンサを搭載した計測専用ロボットを用意するシステム構成も考えられる。こうすればCPSはより安価に実現されるであろう。

第2の例は、Fig. 2.6に示す惑星探査ロボットなどの**未知環境探査ロボット**への利用である。未知の惑星を探査する探査ロボットには、小型の複数のロボットを使用し、冗長シ



Figure 2.6: Multiple planetary robers

ステムとしての高い信頼性を生かすことが有効である。このような群ロボットの有効性はこれまで幾人かの研究者によって主張されてきた。筆者らも、複数のマニピュレータ付き移動ロボットシステムで、通常は分散して諸作業を行い、不整地移動時などにはマニピュレータを連結機構と利用して連結し移動する群ロボット「群龍」を提案し[11]、試作実験を行っている(Fig. 2.7)。群龍のような群ロボットが未知の惑星上で移動し、地質調査や地図作成などを実施する作業を想定すると、そのための位置同定法はデッドレコニング方式、灯台方式とも必要精度、環境条件からして不適當である。それに対しCPSには適用上の障害はほとんど無く有効性が高い。なお、群龍では各ロボットユニットが相互に接近離脱して結合分離を行うことを想定しており、そのためのロボット相対位置計測センサの装備を前提としている。そのため、群龍の場合では新たな計測装置を追加せずにCPSがそのまま利用可能である。

第3の例は、洞窟や建築物、あるいは人間の立ち入ることのできない危険箇所での精密な**自動地図作成システム**である(Fig. 2.8)。前述のようにCPSは移動中の外乱に対して位置同定精度に影響がないことから、ロボットと障害物の衝突を避ける制御が特に必要でな

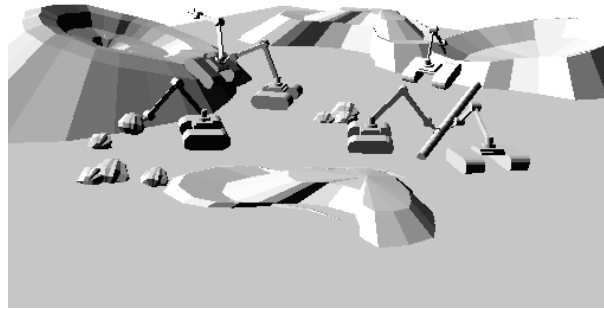


Figure 2.7: Multiple planetary rovers “Gunryu”

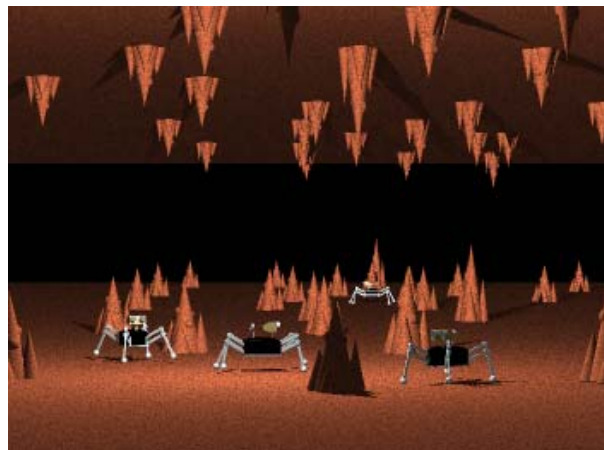


Figure 2.8: Exploration in a cave

く、ロボット外周に近接センサや接触センサを取り付け、壁や柱などの障害物と接触するように移動させることにより、簡単に自動地図作成システムを構築することができる。また火山噴火直後の復旧作業では、土積流などの二次災害を防ぐため、砂防ダム建設などの危険箇所での土木作業が必要であるが、GPS では現在のところ数 mm 単位の精密な測定を短時間で行なうことは困難であり、精密測量と同等の精度が期待できる CPS の利用が有効であると考えられる。

2.6 CPS における課題

本論文で提案する CPS を実用化する上で、高い位置同定精度を実現するための群ロボットの最適移動形態など、位置同定そのものの効率化、高精度化を目的とした最適協調制御問題は最も基本的かつ重要な検討課題である。また清掃作業や環境地図の作成など群ロボットの本来の利用目的である様々なタスクの実行と、そのタスクを効率的に実行するのに必要不可欠な位置同定の、2つの異なる作業目標を、ロボット台数や作業時間など様々な制

約のもとでどのように協調的、相補的に効率良く実現するかといった、タスクと位置同定の協調制御問題についても検討する必要がある。

我々は今後これら CPS で解決すべき課題について順次検討を行なっていく予定であるが、本項ではまず CPS における課題について様々な側面から整理し、今後の研究の指針とする。

2.6.1 CPS の高精度化、効率化の検討

CPS は高精度な位置同定が可能であるが、その同定精度は搭載する測定機器の精度のみならず、各ロボットの運動履歴や位置同定に利用するロボットの台数によって大きく変化する。また観測を行うロボット間の距離や各ロボットの動作手順は、直接、群全体の移動速度、移動効率に影響を及ぼす。このように CPS の高精度化、効率化を実現するために、各ロボットをどのような手順で移動させ、いつ観測を行うかといった、CPS の最適協調制御問題について今後詳細に検討する必要がある。この問題については第 3 章～第 5 章で引き続き検討する。

2.6.2 タスクと位置同定の協調

清掃作業や環境地図の作成など、群ロボットの本来の利用目的である様々なタスクを効率的に実現するために、それらタスクと CPS による位置同定をどのように協調して実行するかも CPS の重要な検討課題である。

例えば、前述のように清掃ロボット群に CPS を利用する場合、全ての清掃ロボットが交互に静止するのでは、静止時に作業が中断されるため作業効率が低くなり、また測定回数も多くなることから測定精度が低下することが考えられる。しかし実際の清掃ロボットでは、CPS によって実現される高精度な位置同定は常には必要ないことを考えると、CPS により常に正確な位置同定を行う位置同定用ロボットと、その位置同定用ロボットを観測したり、あるいは位置同定用ロボットから得られる情報により大まかな自己位置同定を行いながら、清掃作業を継続して実行する清掃用ロボットの 2 種類のロボットを利用したほうが、作業効率の高いシステムを構築できる。一方、測量作業ロボットや未知環境の調査を行う探査ロボットなど、位置同定そのものがタスクになる場合には、全てのロボットに対して CPS を用いた正確な位置同定を行なうべきである。

2.6.3 位置同定法／システム間の協調

CPS では前述のように静止ロボットの存在が群全体の移動速度の低下を引き起こす場合があり、またデッドレコニング法に比べて誤差の蓄積は少ないものの、長距離の移動ではやはり同定誤差の増加が問題になることも予想される。そこで CPS を高速の移動が可能なデッドレコニング法や、環境にあらかじめ設置されたランドマークを定期的に観測し位置を修正するなど、他の位置同定手法と併用することが有効な場合も考えられる。また、CPS を用いて独立して移動しているあるロボット群が、ある時刻で別のロボット群に吸収される場合や、逆にロボット群が分裂する場合など、それぞれの同定精度やロボット台数

に応じて複数の位置情報をどのように融合、分離するかといった CPS 同士の協調問題も考えられ、このような複数の位置同定法／システム間の協調問題についても検討されなければならない。

2.6.4 外部環境への適応

CPS では、同定精度や作業効率は静止ロボットやロボットによって設置されたランドマークの位置によって大きく変化する。しかしそれらの位置はロボットが常に自由に選択できるものではなく、高低差の存在や道幅の制限、安定した静止状態の成否など周囲の環境状態に応じて決定されるものである。従って例えば見通しのよい草原や小高い丘といった外部環境の特徴的状态を利用して、遠方や障害物の多い環境からでもできるだけ認識しやすい位置にランドマークを設置する、あるいは完全な静止が困難な環境では多くの台数のロボットを用いて位置同定精度の低下を防ぐなど、外部環境に適応した移動戦略の実現も重要である。

2.7 今後の展開

以上のように、CPS は他の手法では置換し難い特長があり、応用分野によっては有効に利用できる位置同定法であるが、CPS を実用化するには上述した様々な課題に対して総合的な考察を積み重ねることが必要と考えられる。我々は今後これらの問題について順次検討を行っていく予定であるが、本論文ではそのうち計測精度に関する基本的な問題点について、理論的、解析的検討、及び 3 種類の CPS 機械モデル CPS-I,II,III を用いた移動測定実験を通して、これまでに得られた知見を整理し CPS 実用化への足掛りを与えることとする。

2.8 第一次機械モデル CPS-I による測定実験

まず提案する CPS が工学的に実現可能か否かを実験的に検討するため、3 台の車輪型移動ロボットからなる群ロボットシステム CPS-I を試作し、移動測定実験を行なった。本試作システムは、各ロボットに搭載されたレーザレンジファインダとフォトディテクタにより、相互のロボットの探索、ロボット間の相対距離と角度の計測、更にその計測結果に基づいた各ロボットの位置同定と移動動作を自動的に実行するものである。

2.8.1 移動ロボットの構成と測定メカニズム

CPS を実現するためには、測定を実施するロボットが環境内の何処かに存在する被測定ロボットを探索・検知し、さらに検知された被測定ロボットとの相対距離や角度を正確に計測する機構を備える必要がある。これらの機構の実現方法としては、i) 被測定ロボットが発信器や光学的ビーコンなどを搭載し、それを測定ロボットが受信器や PSD などの光センサ、あるいはテレビカメラなどで検知して受動的に距離、角度を測定する方式や、ii) 測定ロボットがレーザ光や超音波を投射して被測定ロボットを検知し、能動的に測定を行な

う方式などが考えられる．そこで我々はi)については2次元PSDと赤外LEDを，ii)についてはレーザビーム光とフォトセンサを用いた測定機構を試作し，測定実験を行なった結果，ii)の方式がSN比を高く，かつ測定精度が向上できることがわかり，試作する機構ではこの方式を選択することとした．またii)の方式のうちでは，レーザビーム光の反射時間から距離を計測するレーザレンジファインダが近年使いやすくなっており，感度，精度とも良好なためこれを使用することとした．

さて，ii)のレーザビーム光によるレーザレンジファインダ方式で被測定ロボットを探索するには，例えばビーム光を上下左右方向に走査し，被測定ロボットに搭載されたコーナキューブからの反射光を測定ロボットで検出するなどの方法が考えられる．しかし，ロボット周囲の全方向を実用的な時間内で探索するためには高速なビーム走査機構が，また被測定ロボットを確実に特定するためには，その高速ビーム光を検出し得る被測定ロボット側の高感度レーザ検出器がそれぞれ必要である．そこで我々は，できるだけ簡素な機構で必要な機能を実現することを目指し，レーザスリット光の水平方向走査とレーザレンジファインダから投射されるビーム光の垂直方向走査を組み合わせる機構を開発した．開発した機構は，Fig. 2.9に示すようにロボット本体上部のヘッド部にビーム光を投射し反射点までの距離を計測するレーザレンジファインダ，sagittal plane 状のスリット光を投射するシリンドリカル・レーザ，あらゆる方向からのレーザ光を検出できるように複数のフォトセンサを周囲に配置したレーザ光検出器，レーザレンジファインダからのレーザビームを上下に走査するためのレーザスキャン用ミラーを装備している．そしてこのヘッド部を本体内のヘッド部駆動用モータで本体鉛直軸方向まわりに回転できるようにした．レーザレン

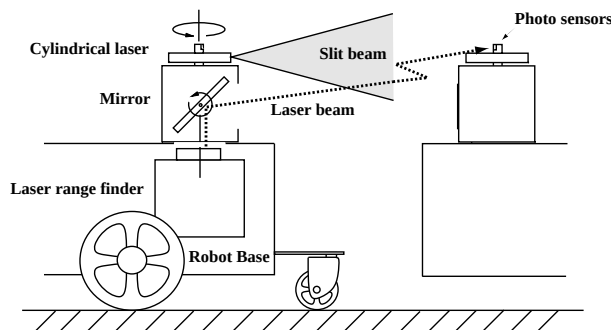


Figure 2.9: Construction of the sensor system.

ジファインダのビーム光光軸は，スリット光のなす平面に一致するよう，あらかじめ精密に調整してある．

ロボット間相対距離の測定は以下のようにして行う．

1. スリット光を投射しながらヘッド部を鉛直軸まわりに回転させ，被測定ロボットのフォトセンサがスリット光を検出したら，ヘッドの回転を止める．
2. レーザレンジファインダからビーム光を投射し，レーザスキャン用ミラーを回転して上下に走査する．そして被測定ロボットのフォトセンサがビーム光を検出したら，ミラーの回転を止める．

3. 相対距離をレーザレンジファインダにより測定する．また同時に相対角度としてヘッド部回転角度とミラー回転角度を、各モータに内蔵されたエンコーダにより測定する．

このように開発した計測機構は、簡単な機構で全方向的な被測定ロボットの探索を比較的速くかつ確実にこなせるようになっている．また被測定ロボットの特定期間光センサが反応するため容易に実行できる．本機構を搭載した移動ロボット群およびセンサ部分の構成を Figs. 2.10, 2.11, および Table 2.1 に示す．



Figure 2.10: Appearance of the mobile robots.

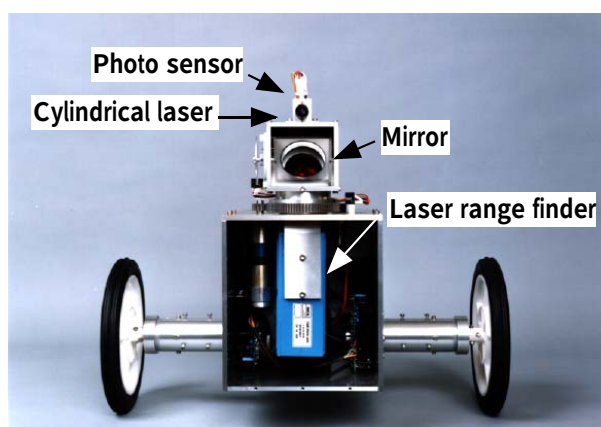


Figure 2.11: Appearance of the sensor system.

CPS-I の基本的な動作手順は以下のようなになる．まずロボット 1, 2 の初期位置を測定した後、Fig. 2.12 に示すように

1. ロボット 3 が移動、静止する．
2. ロボット 1 がロボット 2 とロボット 3 の相対角度 θ_1, ϕ_1 を計測する．
3. ロボット 2 がロボット 1 とロボット 3 の相対角度 θ_2, ϕ_2 を計測する．

Table 2.1: Specifications of the system.

Size	$610 \times 470 \times 390$ [mm] (for each robot)
Weight	15 [kg] (for each robot)
CPU's	SPARC $\times 2$
Range finder	DME 2000 (ZICK optic electronic) MODE 1: range ~ 2047 [mm] resolution 1 [mm] precision ± 5 [mm] MODE 2: range ~ 131.071 [m] resolution 1 [mm] precision ± 13 [mm]
Cylindrical laser	AIM-88LI (LEONIX) λ_p 690 [nm] power 16.0 [mW]
Photo sensor	TPS607A (TOSHIBA) λ_p 720 [nm] I_F 600 $\sim$ 3600 [μA]

4. ロボット 1,2 の位置 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$, 及び計測された $\theta_1, \theta_2, \phi_1, \phi_2$ を用い, 式 (2.4),(2.5),(2.6) からロボット 3 の位置 (x_3, y_3, z_3) を計算する.
5. ついで静止ロボット 1 を移動させ, 同様の計測を繰り返す.

2.8.2 移動測定実験

CPS-I を用いた位置同定実験の一例を示す. 本システムは未だ無線化しておらず, また実験スペースの制約もあることから, ひとまず平坦地を 2m 前方の地点の目標地へ 3 回の協調ポジショニング動作で到達する実験を行った. このときの各ロボットの移動パターンを Fig. 2.13 に示す. 実験の結果, 位置同定精度は平均で移動距離の 0.92% であった. 本試作システムにはヘッド部回転機構およびミラー回転機構のガタがまだ残っており, 計測精度は低く改善の余地が残されている. しかし本システムでデッドレコニングを行ってみたところ, その位置同定精度は走行距離の 1.46% であったことから, 本試作システムは少なくともデッドレコニング方式よりは, 現状でもより良い計測を行っていることが確認できた.

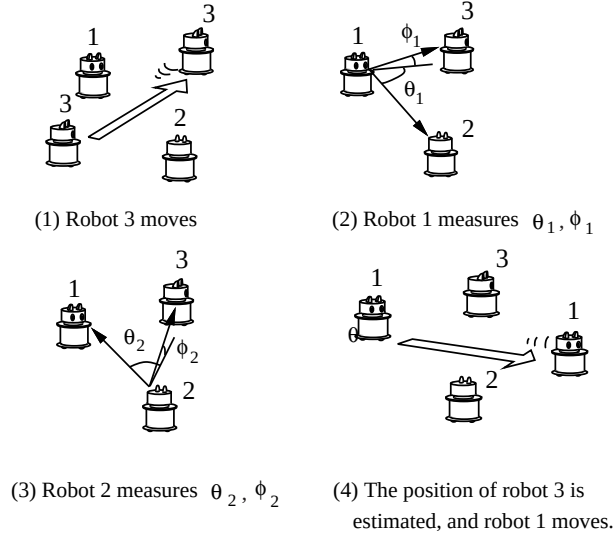


Figure 2.12: Basic movement of CPS-I

2.9 まとめ

本章ではまず従来困難であった未知／不整地環境における移動ロボットの高精度な位置同定を可能にする「協調ポジショニングシステム (CPS)」を提案し、その基本構成と特性、応用分野、及び解決すべき課題などを整理した。さらに CPS の工学的実現可能性を検討するため、ビーム光を用いたレーザレンジファインダとスリット光源及びフォトセンサからなる新たな測定機構を提案し、これを用いた第一次 CPS 機械モデル CPS-I による移動測定実験を行った。その結果、未だ初期実験の段階であるが、少なくともデッドレコニング方式よりは正確な計測が自動的に実施できることがわかった。

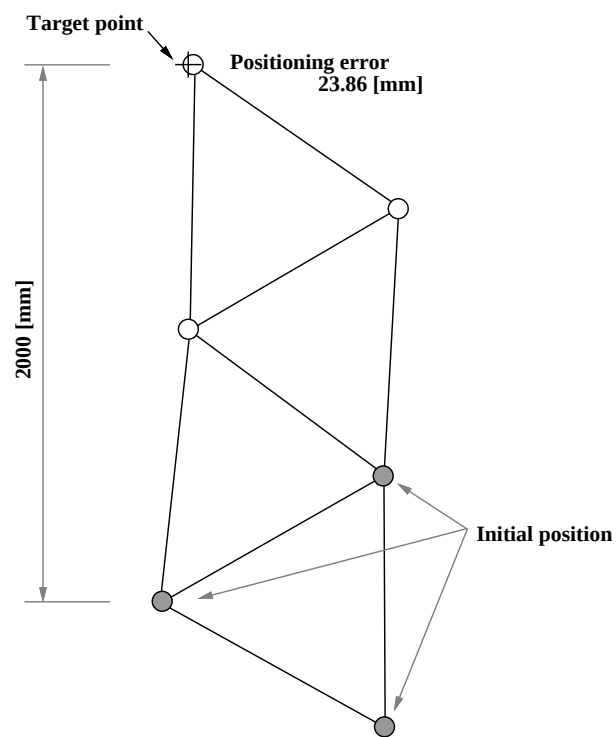


Figure 2.13: An example of experimental results.

第3章 誤差伝播の基本方程式

CPS は、デッドレコニング方式に比較すれば、はるかに誤差の蓄積が少ないと予測される。しかし、ロボット間の相対角度や相対距離の測定誤差は、移動とともにやはり蓄積し、位置同定精度は次第に低下する。そのため、今後 CPS を状況に応じて最適に利用していくためには、個々の計測誤差が全体としての位置同定精度にどのように影響するかを見積るための「CPS 特有の誤差論」を構築していかなければならない。

そこで本章ではこのような誤差論を構築していく準備として、まず最も基本的な CPS として第2章で紹介した CPS-I 型システムを取り上げ、蓄積する位置同定誤差の定量的な評価を可能にする誤差伝播の基本方程式を導出する。次にこれらの基本方程式を用いて、代表的な2種類の移動形態について移動後の位置同定誤差の計算例を示し、同定精度についての基本的な検討を行なう。

なお、これら誤差解析法を導出するにあたり、本論文では計測精度に対して以下の仮定を行う。

1. 計測誤差は偶然誤差であり、その発生確率は確率的に与えられる。
2. 計測誤差の発生確率は平均0のガウス分布に従い、その分散は既知である。

これらの仮定に対し、計測誤差がガウス分布に従わない場合や、系統誤差が支配的であるなど、計測が確率過程としては取り扱えない場合も考えられる。これに対し、例えば Atiya ら [39] は一様分布で近似された計測誤差の重なりによって、視覚センサによる周囲の柱の観測から自己位置を同定する手法を提案しており、また Hanebeck ら [54] は、計測誤差が確率的に与えられない場合に対して同定誤差楕円の重なりで誤差領域を算出する方法を提案している。我々もこれまでに計測誤差が確率的に与えられない場合、すなわち系統誤差が支配的である場合についての検討も行い、線形計画法を利用した定量的解析法を提案している（Appendix 参照）が、後述する測定器の誤差測定実験により、測定誤差がガウス分布に従い確率的に得られることが確認されたことから、本章では偶然誤差に対する誤差解析法を示すことにする。

3.1 誤差分散行列による同定精度の評価

群ロボットが測定を繰り返しながら移動する場合、移動中の位置同定誤差を推定し、定量的な評価を行なうことは、本手法の適用範囲を検証する上で重要である。しかし CPS における位置同定誤差は、搭載した測定器の計測誤差だけでなく、ロボット間相対距離など各ロボットの移動履歴に大きく依存する性質を有する。そこでここでは、第2章で紹介した第一次機械モデル CPS-I と同様に、3台の移動ロボットからなる三角測量の原理を用い

た CPS を取り上げ、各測定誤差が期待値 0 の正規分布に従うと仮定して、各ロボットの移動中の位置推定誤差を誤差分散行列として評価することを試みる。

一例として、**Fig. 3.1** のように平面上を移動する 3 台のロボット 0,1,2 に対し、位置が既知な 2 台のロボット 1,2 からロボット 0 までの方位角を計測して、ロボット 0 の位置を同定する場合を考える。このとき、ロボット 0,1,2 の位置、姿勢を $\mathbf{P}_0(x_0, y_0)$, $\mathbf{P}_1(x_1, y_1)$,

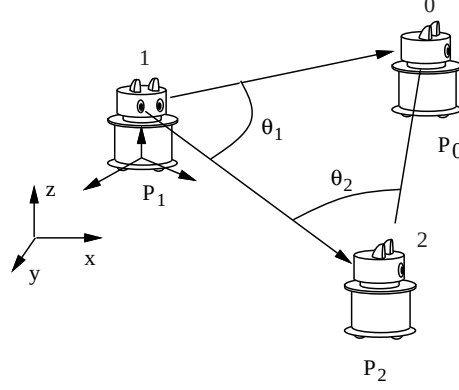


Figure 3.1: Example of position calculation for CPS-I.

$\mathbf{P}_2(x_2, y_2)$, またロボット 1,2 からロボット 0 までの方位角を θ_1, θ_2 とすると、ロボット 0 の位置は以下のように定まる。

$$x_0 = \frac{x_1 \tan \theta_1 - x_2 \tan \theta_2 + (y_2 - y_1) \tan \theta_1 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} \quad (3.1)$$

$$y_0 = \frac{-(x_2 - x_1) \tan \theta_1 \tan \theta_2 + y_1 \tan \theta_1 - y_2 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} \quad (3.2)$$

ただし、角度は全て反時計回りを正とする。ここでロボット i の位置は $\tilde{\mathbf{P}}_i(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ であるが、誤差を含んで $x_i = \tilde{x}_i + dx_i$ と計測された場合、上式の Taylor 展開から、

$$(t_1 - t_2)dx_0 = (\tilde{x}_1 t_1 - \tilde{x}_2 t_2 + (\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1)t_1 t_2 - (t_1 - t_2)\tilde{x}_0) + t_1 dx_1 - t_1 t_2 dy_1 - t_2 dx_2 + t_1 t_2 dy_2 \\ + \frac{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0 + (\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1)t_2}{c_1^2} d\theta_1 + \frac{-\tilde{x}_2 + \tilde{x}_0 + (\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1)t_1}{c_2^2} d\theta_2 \quad (3.3)$$

$$(t_1 - t_2)dy_0 = (-\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1)t_1 t_2 + \tilde{y}_1 t_1 - \tilde{y}_2 t_2 - (t_1 - t_2)\tilde{y}_0) + t_1 t_2 dx_1 + t_1 dy_1 - t_1 t_2 dx_2 - t_2 dy_2 \\ + \frac{\tilde{y}_1 - \tilde{y}_0 + (\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1)t_2}{c_1^2} d\theta_1 + \frac{-\tilde{y}_2 + \tilde{y}_0 + (\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1)t_1}{c_2^2} d\theta_2 \quad (3.4)$$

ただし、

$$t_i = \tan \tilde{\theta}_i \\ c_i = \cos \tilde{\theta}_i$$

であり、ここでは誤差は微小であるとし、2次以降の項は無視した。ここで、さらに

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} t_1 - t_2 & 0 \\ 0 & t_1 - t_2 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 t_1 - \tilde{x}_2 t_2 + (\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1) t_1 t_2 - (t_1 - t_2) \tilde{x}_0 \\ -(\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1) t_1 t_2 + \tilde{y}_1 t_1 - \tilde{y}_2 t_2 - (t_1 - t_2) \tilde{y}_0 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} t_1 & -t_1 t_2 & -t_2 & t_1 t_2 \\ t_1 t_2 & t_1 & -t_1 t_2 & -t_2 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{K}_a = \begin{pmatrix} \frac{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0 + (\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1) t_2}{c_1^2} & \frac{-\tilde{x}_2 + \tilde{x}_0 + (\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1) t_1}{c_2^2} \\ \frac{\tilde{y}_1 - \tilde{y}_0 + (\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1) t_2}{c_1^2} & \frac{-\tilde{x}_2 + \tilde{x}_0 + (\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1) t_1}{c_2^2} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

と置くと、式(3.3),(3.4)は

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{L} + \mathbf{K}(dx_1 \ dy_1 \ dx_2 \ dy_2)^T + \mathbf{K}_a(d\theta_1 \ d\theta_2)^T \quad (3.9)$$

ただし、 $\mathbf{X} = (dx_0 \ dy_0)^T$ と整理できる．そこで、前回までの測定は正確であると仮定して右辺の $dx_i, dy_i, d\theta_i$ などを0とすると、 $\mathbf{A}$ が正則である場合には、 $\mathbf{X}$ は

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{L} \quad (3.10)$$

と求められる、また観測値の誤差を表す $\mathbf{L}$ が0である場合を考えると、式(3.9)の右辺の二乗平均は

$$\Sigma_L = \mathbf{K}\Sigma\mathbf{K}^T + \mathbf{K}_a\Sigma_p\mathbf{K}_a^T \quad (3.11)$$

となる．ここで $\Sigma \in R^{4 \times 4}$ はロボット1,2の誤差分散行列及び1,2間の誤差相関行列からなる行列、 $\Sigma_p \in R^{2 \times 2}$ は測定誤差の誤差分散行列であり、

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

$$\Sigma_p = \text{diag}(\sigma_\theta^2 \ \sigma_\theta^2) \quad (3.13)$$

である．よってこのときのロボット0の位置姿勢推定の分散は、

$$\Sigma_{00} = \mathbf{A}^{-1}\Sigma_L\mathbf{A}^{-T} \quad (3.14)$$

で与えられ、同様にロボット0,1、ロボット0,2間の誤差共分散は

$$(\Sigma_{01}, \Sigma_{02}) = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{K}\Sigma \quad (3.15)$$

となる．

よって具体的には、まずロボット0の位置姿勢を適当な $\tilde{\mathbf{P}}_0$ と仮定して式(4.29)から $\mathbf{X} = (dx_0 \ dy_0 \ d\theta_0)^T$ を求め、これらが十分に小さくなるまで $\tilde{\mathbf{P}}_0 \leftarrow \tilde{\mathbf{P}}_0 + \mathbf{X}$ として計算を繰り返せばよい．またCPSで計測を繰り返した後のロボットの位置同定精度は、各ロボットの移動毎に移動したロボットの種類に応じて式(3.14),(3.15)で与えられる誤差分散行列、誤差相関行列を順次計算することで導出できる．

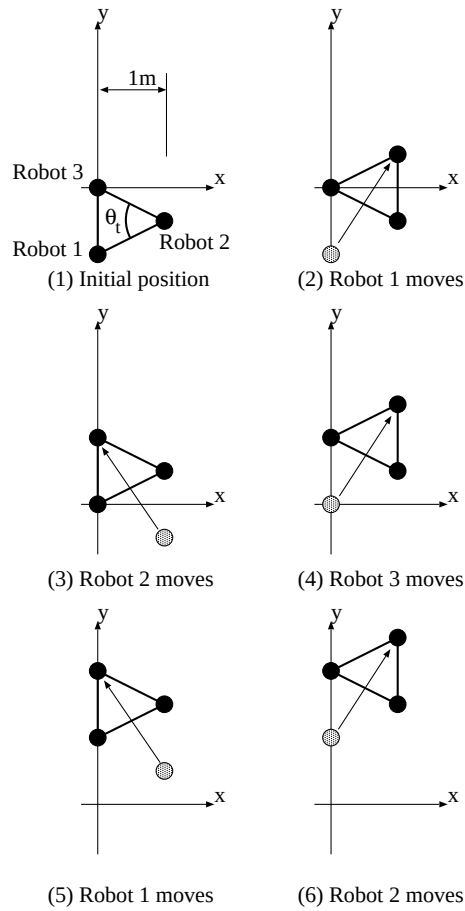


Figure 3.2: Triangle chain pattern A

3.2 位置同定精度の計算例

前項で示した誤差分散行列を用いた誤差解析手法の一例として、ロボット群の作る三角鎖の形状として **Figs. 3.2, 3.3** に示す代表的な 2 タイプを考え、それぞれの三角鎖に対して図に示された代表的な角度 θ_t を定義し、その角度を変化させた場合の 10m 前方の目的位置での誤差分散行列を計算した。ただしここでは測定器の角度計測誤差 σ_θ を 5 秒とした。

計算された誤差分散の一例を **Fig. 3.4** に示す。ただし、このときの誤差は

$$(x \ y) \Sigma^{-1} (x \ y)^T = 1 \quad (3.16)$$

で定義する誤差分散楕円で示すことにする。また代表角度に対する誤差分散行列のトレースの変化を **Fig. 3.5** に、それぞれの三角鎖に対してトレースが最小となる代表角度を **Table 3.1** に示す。

このように両タイプとも、代表角度は 35~50 度のときに目標位置での位置同定誤差が最小になる。また同定誤差の最小値はタイプ A の方が小さく、誤差楕円も等方的であることから、タイプ B に比べて同定精度の高い移動形態であるといえる。

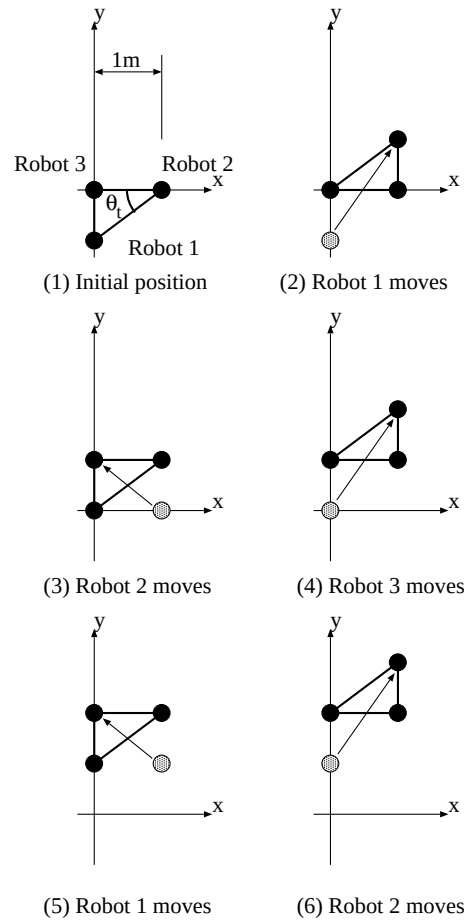


Figure 3.3: Triangle chain pattern B

3.3 まとめ

本章では，まず最も基本的な CPS として第 2 章で紹介した CPS-I 型システムを取り上げ，誤差分散行列を用いて各ロボットの移動履歴に対する累積誤差を推定する誤差解析法を示した．CPS は各ロボットの移動手順や移動距離などによって位置同定精度が異なるが，本手法を用いれば，移動中の各ロボットの同定誤差を推定し，定量的に評価することが可能となる．また提案した誤差評価法の例として，2 種類の代表的な移動パターンに対して移動後の同定誤差を計算し，それぞれに対して位置同定誤差が最小となる条件を示した．

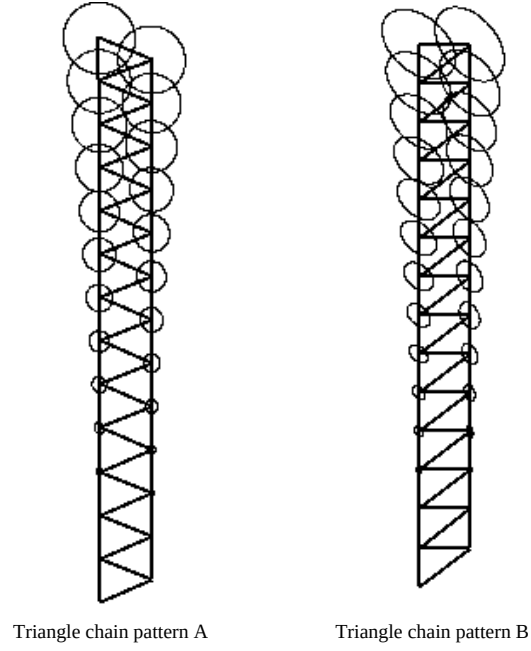


Figure 3.4: Error ellipses shown at each robot positions

Table 3.1: Minimum error variance for each triangle chains

	θ_t [deg.]	$\text{Tr}(\Sigma)$ [m^2]
Chain pattern A	45.2	0.947
Chain pattern B	37.6	0.994

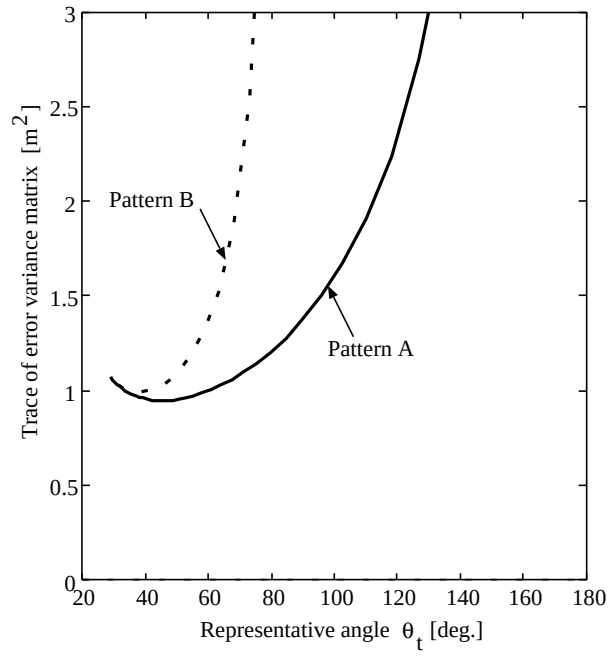


Figure 3.5: The error variance in estimated position with different representative angles

第4章 多数台ロボットの観測による冗長位置情報の融合

CPSでは、各ロボットに搭載するセンサが他のロボットまでの距離と方位を同時に計測できるのであれば、最低2台のロボットで実現可能である。しかし惑星探査群ロボットシステムなど、CPSが有効であると思われる幾つかの応用分野においては、群システムの有する効率性、耐故障性などから、数台～数十台のロボットを同時に利用することが有効であると考えられる。このような多数台のロボットを用いたシステムへのCPSの適用を考えた場合、各ロボットの位置同定時に最低必要台数以上のロボットを利用／観測することにより、1つの同定位置に対して複数の位置情報が得られる。従ってこれらを適切に融合することにより、各位置情報に含まれる測定誤差の影響を抑え、位置同定精度を大幅に向上できる可能性がある。そこで本章ではまず第3章で示した手法を拡張し、複数冗長な情報が存在する場合の位置同定精度に対する重みつき最小二乗法を用いた誤差解析法を誘導する。本手法は著者らが既に提案したCPSに対する位置同定誤差の解析手法[146],[148]と同一の結果を与えるが、複数観測情報の融合や累積誤差の計算をより系統的に容易に実行できるものである。次に冗長位置情報を融合することで位置同定精度が向上する様子を、高性能レーザレンジファインダによる自動相対位置計測システム、及び無線による自律誘導システムからなる第二次CPS機械モデル(CPS-II)を用いた移動測定実験により検証する。

4.1 第二次CPS機械モデル(CPS-II)

本システムは、高精度レーザ距離計測装置を搭載した親ロボットと、コーナーキューブを搭載した2ないし3台の子ロボットから構成され、静止した子ロボットの探索と識別、親子間の相対距離、角度の計測、更にその計測結果に基づいた各ロボットの移動動作を自動的に実行するものである。CPS-IIの動作手順をFig. 4.1に示す。これはまずあらかじめ初期位置を計測してある親ロボットを静止させ、

1. 子ロボット1,2を矢印のように移動させた後、停止させる。
2. 親ロボットに搭載した計測器により、子ロボット1までの相対距離、方位角、仰角を計測し、子ロボット1の位置を同定する。
3. 同様に子ロボット2までの相対距離、方位角、仰角を計測し、子ロボット2の位置を同定する。
4. 親ロボットを矢印のように移動、停止させ、親ロボットにより子ロボット1,2までの相対距離、方位角、仰角を計測して、親ロボットの位置を三辺測量法により同定する。

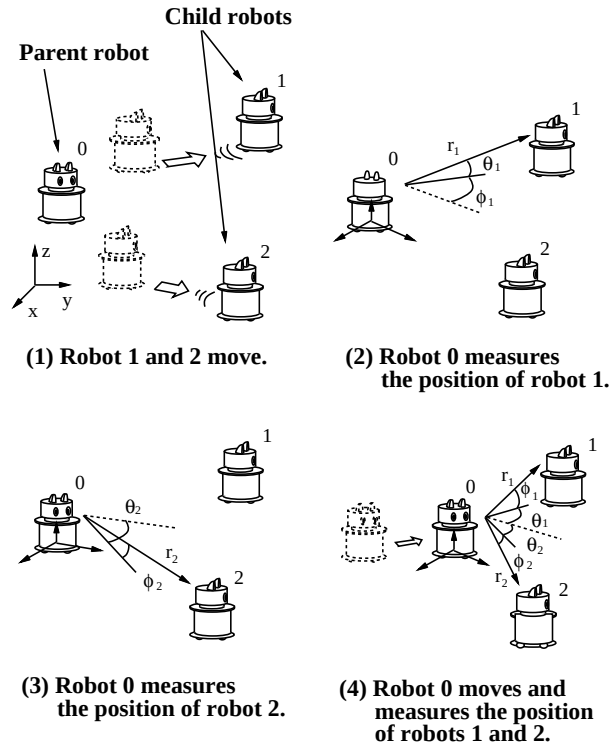


Figure 4.1: Basic principle of CPS-II

という動作手順に従い移動，測定を繰り返すものである．

CPS-II の構成を Fig. 4.2 に，親子ロボットをそれぞれ Figs. 4.3, 4.4 に示す．親ロボットには，コーナーキューブの自動探索機構を有するレーザ距離計測装置 (AP-L1, (株) トプコン製) と 2 軸傾斜計センサ (CMS-05A-XY, 桑野電機 (株) 製) を搭載しており，子ロボットに搭載されたコーナーキューブからの反射光を検知することにより，子ロボットまでの距離と方位を自動的に高精度に計測することができるようにしている．レーザ距離計測装置の諸元を Table 4.1 に示す．また，子ロボット上部には 6 つのコーナーキューブを垂直軸回りに放射状に等間隔で配置し，これにより任意の方向から投射されたレーザ光をその投射された方向へ正確に反射できるようにしている．各ロボットはマイクロコンピュータ (8086-8MHz)，モータ駆動回路 (BLD453, 光進ミニモ (株) 製)，バッテリー (Yuni-Z, 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，RS232C による無線通信を介してオペレータのコンピュータ (S-4/Liea, 富士通 (株) 製) により集中制御する構成としている．

4.2 レーザ距離計測装置の計測誤差特性

まず CPS-II に搭載したレーザ距離計測装置の計測誤差特性を評価するため，多数回の定点観測によりレーザ距離計測装置の測距，測角誤差精度を計測した．計測実験は，コーナーキューブをレーザ距離計測装置本体から 2m～60m の距離に設置し，各コーナーキューブまでの距離を繰り返し計測して測定距離の読み値の分散を求めるものとした．測定結果を

Table 4.1: Specifications of a range finder.

AP-L1 (TOPCON Ltd.)	
Range	4 ~ 400 [m]
Resolution (distance)	0.2 [mm]
Resolution (angle)	5 ["]
Precision (distance)	$\pm 3 + 2\text{ppm}$ [mm]
Precision (angle)	± 5 ["]

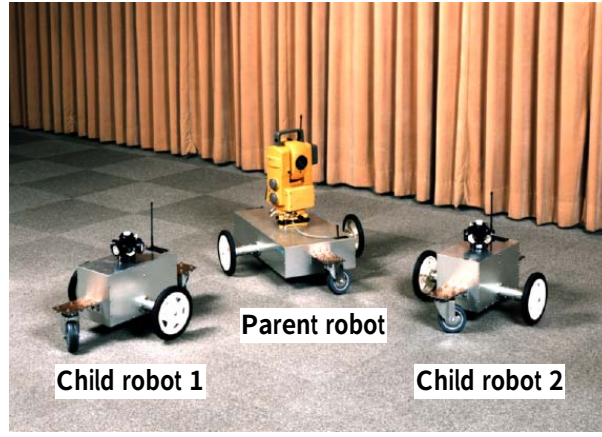


Figure 4.2: Total view of the mechanical model CPS-II.

Fig. 4.5 に示す．一般に通常の距離センサでは，測定誤差は測定距離が大きくなるに従い増大するものと考えられるが，使用したレーザ距離測定装置では少なくとも計測距離が5～60m の場合には，計測距離の分散値は距離によらずほぼ一定値で与えられるという特有の性質を示すことがわかった．これは調査の結果，光波あるいは電磁波を用いた距離計測装置に特有の性質であり，測定地点間の距離がそれほど大きくなく，温度差や大気中の水蒸気量などにより空気の屈折率が変化しなければ，測定誤差の影響は測定距離に無関係に与えられるためとされている [138]．

また本計測器の測定誤差の特性を知るため，コーナキューブを測定器本体から 60m 離して設置し，距離と方位角，仰角を繰り返し 50 回計測した．それぞれ得られた値を **Fig. 4.6** に示す．またそれぞれについて，次式で与えられる自己相関を計算した．

$$R(\Delta) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-\Delta-1} (d_i - \bar{d})(d_{i+\Delta} - \bar{d}) \quad (4.1)$$

ただし d_i は各測定値， N は全データ数， $\bar{d}$ は次式で与えられるデータの平均値である．

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} d_i \quad (4.2)$$

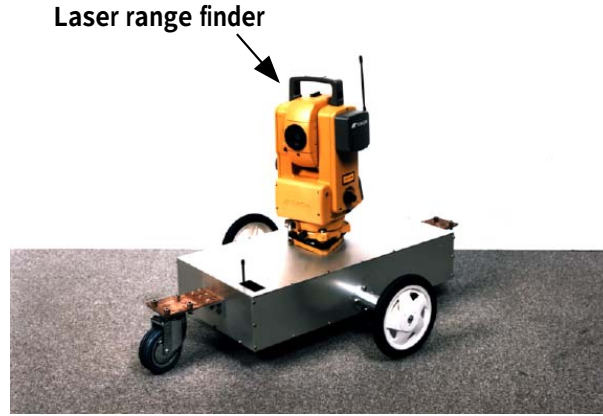


Figure 4.3: The parent robot of CPS-II.

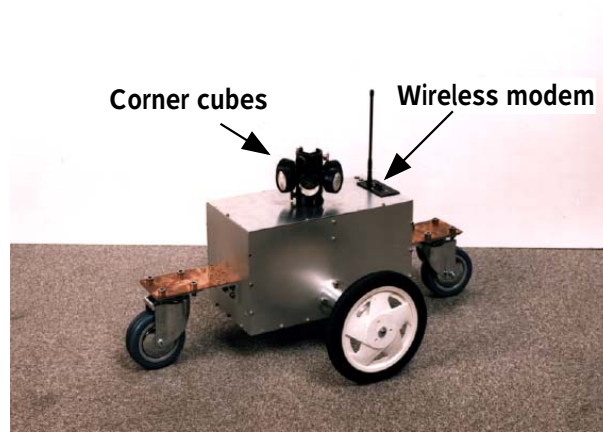


Figure 4.4: The child robot of CPS-II.

この自己相関値 $R(\Delta)$ の $\Delta = 0$ での値 $R(0)$ に対する比を **Fig. 4.7** に示す. 測定誤差が白色ノイズである場合には, この値は

$$\frac{R(\Delta)}{R(0)} = \begin{cases} 1 & \Delta = 0 \\ 0 & \Delta \neq 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

であるが, **Fig. 4.7** より本レーザ距離計測装置の計測誤差はほぼ白色性を有することが確認できる. また, 読み値の頻度分布を **Fig. 4.8** に示す. これより計測誤差の出現確率は, **Table 4.2** に示す標準偏差 ($= \sqrt{R(0)}$) で表されるガウス分布に従うと考えられる.

これらの実験から, 以降の実験及び解析ではCPS-IIの測定誤差として以下の性質を設定することとした.

1. 測角, 測距誤差は中心0のガウス分布とする.
2. 測距, 測角誤差の分散値は, 計測距離, 角度によらずある一定値とする.

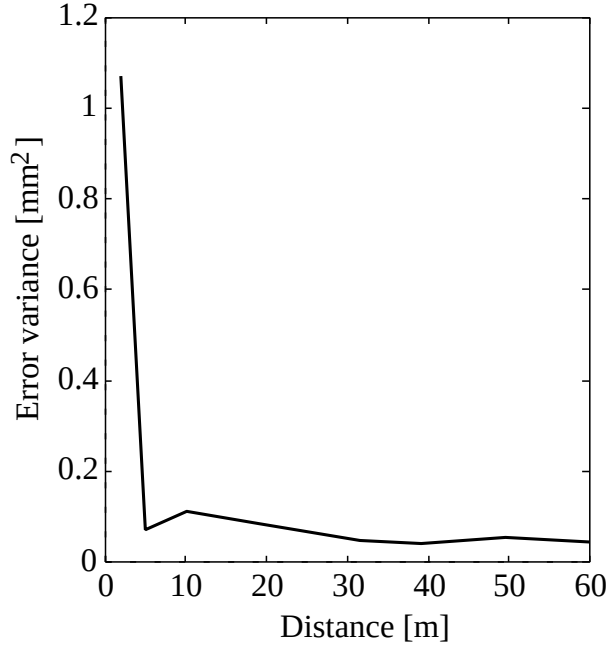


Figure 4.5: Distance measurement errors

Table 4.2: Averages and standard deviations of the laser range finder

	Average	Standard deviation
Distance	60803.96 [mm]	0.23 [mm]
Azimuth angle	4.95 [deg.]	6.39 [sec.]
Elevation angle	90.10 [deg.]	3.12 [sec.]

4.3 冗長位置情報の融合手法

我々は文献 [146],[148] で、多数台のロボットから構成される CPS に対して、観測の結果得られる複数冗長な位置情報を最尤推定法を用いて融合することにより、位置同定精度の向上を図る手法を提案した。本手法は、群全体から三台のロボットを選ぶ全ての組み合わせに対して各推定位置を計算し、誤差分散行列を用いた加重平均により最終的な同定位置を計算するものである。しかし本手法では、ロボットの台数 n が増加するにつれて、計算量が $O(n^2)$ で増加してしまう。一方、前章で示した誤差解析法によれば、新たな計測情報は観測方程式 3.9 の行列 $\mathbf{A}$, $\mathbf{L}$ に付け加えるだけであり、計算量は $O(n)$ となる。そこで以降では、まず第 3 章で示した誤差解析法を、CPS-II で採用した相対距離計測を用い、かつ冗長な位置情報が利用可能である場合に拡張した例を示す。

Fig. 4.9 のように 4 台のロボット 0,1,2,3 からなる CPS に対し、ロボット 0 から、位置が既知な 3 台のロボット 1,2,3 までの距離および方位角を計測して、ロボット 0 の位置を同定する場合を考える。このとき、ロボット 0,1,2, および 3 の位置、姿勢を $\mathbf{P}_0(x_0, y_0, z_0, \theta_0)$,

$\mathbf{P}_1(x_1, y_1, z_1, \theta_1)$, $\mathbf{P}_2(x_2, y_2, z_2, \theta_2)$, $\mathbf{P}_2(x_3, y_3, z_3, \theta_3)$, またロボット 0 からロボット 1,2,3 までの距離を r_1, r_2, r_3 , 方位角を ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 , 仰角を ψ_1, ψ_2, ψ_3 とすると, 観測方程式は,

$$(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 = r_1^2 \cos^2 \psi_1 \quad (4.4)$$

$$(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 = r_2^2 \cos^2 \psi_2 \quad (4.5)$$

$$(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 = r_3^2 \cos^2 \psi_3 \quad (4.6)$$

$$z_0 = z_1 - r_1 \sin \psi_1 \quad (4.7)$$

$$= z_1 - r_2 \sin \psi_2 \quad (4.8)$$

$$= z_1 - r_3 \sin \psi_3 \quad (4.9)$$

$$\theta_0 = -\phi_1 + \tan^{-1} \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (4.10)$$

$$= -\phi_2 + \tan^{-1} \frac{y_2 - y_0}{x_2 - x_0} \quad (4.11)$$

$$= -\phi_3 + \tan^{-1} \frac{y_3 - y_0}{x_3 - x_0} \quad (4.12)$$

の 9 つである. ところが決定すべき変数はロボット 0 の位置 (x_0, y_0, z_0) , 姿勢 θ_0 の 4 つであるから, この観測情報は冗長である. そこで $x_i = \tilde{x}_i + dx_i$ 等とおき, Taylor 展開すると,

$$\begin{aligned} & -\frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_0}{d_i} dx - \frac{\tilde{y}_i - \tilde{y}_0}{d_i} dy = \\ & (\tilde{r}_i \cos \tilde{\psi}_i - d_i) - \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_0}{d_i} dx_i - \frac{\tilde{y}_i - \tilde{y}_0}{d_i} dy_i + \cos \tilde{\psi}_i dr_i - \tilde{r}_i \sin \tilde{\psi}_i d\psi_i \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$dz = (\tilde{z}_i - \tilde{r}_i \sin \tilde{\psi}_i - \tilde{z}_0) + dz_i - \sin \tilde{\psi}_i dr_i - \tilde{r}_i \cos \tilde{\psi}_i d\psi_i \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\tilde{y}_i - \tilde{y}_0}{d_i^2} dx - \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_0}{d_i^2} dy - d\theta_0 = \\ & (\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0 - \tan^{-1} \frac{\tilde{y}_i - \tilde{y}_0}{\tilde{x}_i - \tilde{x}_0}) + \frac{\tilde{y}_i - \tilde{y}_0}{d_i^2} dx_i - \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_0}{d_i^2} dy_i + d\phi_i \end{aligned} \quad (4.15)$$

ただし $d_i = \sqrt{(\tilde{x}_i - \tilde{x}_0)^2 + (\tilde{y}_i - \tilde{y}_0)^2}$, $i = 1 \sim 3$ であり, 前章と同様に誤差は微小であるとし, 2 次以降の項は無視した. 従って,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\frac{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0}{d_1} & -\frac{\tilde{y}_1 - \tilde{y}_0}{d_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{\tilde{y}_1 - \tilde{y}_0}{d_1^2} & -\frac{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0}{d_1^2} & 0 & -1 \\ -\frac{\tilde{x}_2 - \tilde{x}_0}{d_2} & -\frac{\tilde{y}_2 - \tilde{y}_0}{d_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{\tilde{y}_2 - \tilde{y}_0}{d_2^2} & -\frac{\tilde{x}_2 - \tilde{x}_0}{d_2^2} & 0 & -1 \\ -\frac{\tilde{x}_3 - \tilde{x}_0}{d_3} & -\frac{\tilde{y}_3 - \tilde{y}_0}{d_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{\tilde{y}_3 - \tilde{y}_0}{d_3^2} & -\frac{\tilde{x}_3 - \tilde{x}_0}{d_3^2} & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} \tilde{r}_1 \cos \tilde{\psi}_1 - d_1 \\ \tilde{z}_1 - \tilde{r}_1 \sin \tilde{\psi}_1 - \tilde{z}_0 \\ \tilde{\phi}_1 + \tilde{\theta}_0 - \tan^{-1} \frac{\tilde{y}_1 - \tilde{y}_0}{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0} \\ \tilde{r}_2 \cos \tilde{\psi}_2 - d_2 \\ \tilde{z}_2 - \tilde{r}_2 \sin \tilde{\psi}_2 - \tilde{z}_0 \\ \tilde{\phi}_2 + \tilde{\theta}_0 - \tan^{-1} \frac{\tilde{y}_2 - \tilde{y}_0}{\tilde{x}_2 - \tilde{x}_0} \\ \tilde{r}_3 \cos \tilde{\psi}_3 - d_3 \\ \tilde{z}_3 - \tilde{r}_3 \sin \tilde{\psi}_3 - \tilde{z}_0 \\ \tilde{\phi}_3 + \tilde{\theta}_0 - \tan^{-1} \frac{\tilde{y}_3 - \tilde{y}_0}{\tilde{x}_3 - \tilde{x}_0} \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_1 &= \begin{pmatrix} -\frac{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0}{d_1} & -\frac{\tilde{y}_1 - \tilde{y}_0}{d_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tilde{y}_1 - \tilde{y}_0}{d_1^2} & -\frac{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0}{d_1^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\tilde{x}_2 - \tilde{x}_0}{d_2} & -\frac{\tilde{y}_2 - \tilde{y}_0}{d_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\tilde{y}_2 - \tilde{y}_0}{d_2^2} & -\frac{\tilde{x}_2 - \tilde{x}_0}{d_2^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\tilde{x}_3 - \tilde{x}_0}{d_3} & -\frac{\tilde{y}_3 - \tilde{y}_0}{d_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\tilde{y}_3 - \tilde{y}_0}{d_3^2} & -\frac{\tilde{x}_3 - \tilde{x}_0}{d_3^2} & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} KP_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & KP_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & KP_3 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_2 &= \begin{pmatrix} \cos \tilde{\psi}_1 & 0 & -\tilde{r}_1 \sin \tilde{\psi}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \tilde{\psi}_1 & 0 & -\tilde{r}_1 \cos \tilde{\psi}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \tilde{\psi}_2 & 0 & -\tilde{r}_2 \sin \tilde{\psi}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \tilde{\psi}_2 & 0 & -\tilde{r}_2 \cos \tilde{\psi}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \tilde{\psi}_3 & 0 & -\tilde{r}_3 \sin \tilde{\psi}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin \tilde{\psi}_3 & 0 & -\tilde{r}_3 \cos \tilde{\psi}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} KA_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & KA_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & KA_3 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.19)$$

と置くと、式(4.13),(4.14),(4.15)は

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{L} + \mathbf{K}_1\mathbf{X}_{1,2,3} + \mathbf{K}_2\mathbf{P} \quad (4.20)$$

と整理できる。ただし、

$$\mathbf{X} = (dx_0 \ dy_0 \ dz_0 \ d\theta_0)^T \quad (4.21)$$

$$\mathbf{X}_{1,2,3} = (dx_1 \ dy_1 \ dz_1 \ d\theta_1 \ dx_2 \ dy_2 \ dz_2 \ d\theta_2 \ dx_3 \ dy_3 \ dz_3 \ d\theta_3)^T \quad (4.22)$$

$$\mathbf{P} = (dr_1 \ d\phi_1 \ d\psi_1 \ dr_2 \ d\phi_2 \ d\psi_2 \ dr_3 \ d\phi_3 \ d\psi_3)^T \quad (4.23)$$

である．また観測値の誤差を表す $\mathbf{L}$ の平均値が 0 である場合を考えると，式 (4.20) の右辺の二乗平均は

$$\begin{aligned} \Sigma_L &= \mathbf{K}_1 \Sigma \mathbf{K}_1^T + \mathbf{K}_2 \Sigma_p \mathbf{K}_2^T \\ &= \begin{pmatrix} KP_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & KP_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & KP_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} & \Sigma_{13} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} & \Sigma_{23} \\ \Sigma_{31} & \Sigma_{32} & \Sigma_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} KP_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & KP_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & KP_3 \end{pmatrix}^T \\ &\quad + \begin{pmatrix} KA_1 \\ KA_2 \\ KA_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Sigma_p & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_p & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Sigma_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} KA_1 \\ KA_2 \\ KA_3 \end{pmatrix}^T \\ &= \begin{pmatrix} KP_1 \Sigma_{11} KP_1^T & KP_1 \Sigma_{12} KP_2^T & KP_1 \Sigma_{13} KP_3^T \\ KP_2 \Sigma_{21} KP_1^T & KP_2 \Sigma_{22} KP_2^T & KP_2 \Sigma_{23} KP_3^T \\ KP_3 \Sigma_{31} KP_1^T & KP_3 \Sigma_{32} KP_2^T & KP_3 \Sigma_{33} KP_3^T \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$+ \begin{pmatrix} KA_1 \Sigma_p KA_1^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & KA_2 \Sigma_p KA_2^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & KA_3 \Sigma_p KA_3^T \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

と求められる．ただし Σ_p は

$$\Sigma_p = \text{diag}(\sigma_r^2 \ \sigma_\phi^2 \ \sigma_\psi^2) \quad (4.26)$$

である．

さて，式 (4.20) において解 $\mathbf{X}$ を求める時，係数行列 $\mathbf{A}$ は正方行列ではないため，第 3 章で示した手法は利用できない．そこで残差方程式

$$\mathbf{V} = \mathbf{L} - \mathbf{A}\mathbf{X} \quad (4.27)$$

を考え，この Σ_L^{-1} で重みづけられた残差二乗和，すなわち

$$\min \mathbf{V}^T \Sigma_L^{-1} \mathbf{V} \quad (4.28)$$

を最小化する $\mathbf{X}$ を求めることにする．式 (4.28) に式 (4.25),(4.27) を代入し $\mathbf{X}$ で微分すると，残差 2 乗和を最小にするロボット 0 の位置偏差 $\mathbf{X}$ は

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= (\mathbf{A}^T \Sigma_L^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Sigma_L^{-1} \mathbf{L} \\ &= \mathbf{B}\mathbf{L} \end{aligned} \quad (4.29)$$

と誘導できる．

またこのときのロボット 0 の位置姿勢推定の分散は，式 (4.29) より

$$\Sigma_{00} = \mathbf{B}\Sigma_L\mathbf{B}^T = (\mathbf{A}^T \Sigma_L^{-1} \mathbf{A})^{-1} \quad (4.30)$$

で与えられ，同様にロボット 0,1，ロボット 0,2 間の誤差共分散は

$$(\Sigma_{01}, \Sigma_{02}) = \mathbf{B}\mathbf{K}\Sigma \quad (4.31)$$

となる。

また子ロボット i が移動静止し、親ロボットにより位置を同定する場合を考える。このとき子ロボットの位置は、

$$x_i = x_0 + r_i \cos(\phi_i + \theta_0) \cos \psi_i \quad (4.32)$$

$$y_i = y_0 + r_i \sin(\phi_i + \theta_0) \cos \psi_i \quad (4.33)$$

$$z_i = z_0 + r_i \sin \psi_i \quad (4.34)$$

$$\theta_i = \text{unknown} \text{ (仮に } \phi_i + \theta_0 \text{ とする)} \quad (4.35)$$

となるが、 $x_i = \tilde{x}_i + dx_i$ 等とおき Taylor 展開すると、

$$\begin{aligned} dx_i = dx_0 - \tilde{r}_i \sin(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i d\theta_0 + \cos(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i dr_i - \tilde{r}_i \sin(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i d\phi_i \\ - \tilde{r}_i \cos(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \sin \tilde{\psi}_i d\psi_i + \tilde{x}_0 + \tilde{r}_i \cos(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i - \tilde{x}_i \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned} dy_i = dy_0 + \tilde{r}_i \cos(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i d\theta_0 + \sin(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i dr_i + \tilde{r}_i \cos(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i d\phi_i \\ - \tilde{r}_i \sin(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \sin \tilde{\psi}_i d\psi_i + \tilde{y}_0 + \tilde{r}_i \sin(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i - \tilde{y}_i \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$dz_i = dz_0 + \sin \tilde{\psi}_i dr_i + \tilde{r}_i \cos \tilde{\psi}_i d\psi_i + \tilde{z}_0 + \tilde{r}_i \sin \tilde{\psi}_i - \tilde{z}_i \quad (4.38)$$

$$d\theta_i = d\phi_i + d\theta_0 + \tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0 \quad (4.39)$$

が得られる。従って子ロボット i の位置偏差、誤差分散行列、誤差相関行列は、

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{L} + \mathbf{A}\mathbf{X}_0 + \mathbf{K}(dr \ d\phi \ d\psi)^T \quad (4.40)$$

$$\Sigma_{ii} = \mathbf{A}\Sigma_{00}\mathbf{A}^T + \mathbf{K}\Sigma_p\mathbf{K}^T \quad (4.41)$$

$$\Sigma_{i0} = \mathbf{A}\Sigma_{00} \quad (4.42)$$

$$\Sigma_{ij} = \mathbf{A}\Sigma_{00}\mathbf{A}^T \quad (4.43)$$

で与えられる。ただし、

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \cos(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i & -\tilde{r}_i \sin(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i & -\tilde{r}_i \cos(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \sin \tilde{\psi}_i \\ \sin(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i & \tilde{r}_i \cos(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i & -\tilde{r}_i \sin(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \sin \tilde{\psi}_i \\ \sin \tilde{\psi}_i & 0 & \tilde{r}_i \cos \tilde{\psi}_i \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.44)$$

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_0 + \tilde{r}_i \cos(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i - \tilde{x}_i \\ \tilde{y}_0 + \tilde{r}_i \sin(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i - \tilde{y}_i \\ \tilde{z}_0 + \tilde{r}_i \sin(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) - \tilde{z}_i \\ \tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0 \end{pmatrix} \quad (4.45)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -\tilde{r}_i \sin(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i \\ 0 & 1 & 0 & \tilde{r}_i \cos(\tilde{\phi}_i + \tilde{\theta}_0) \cos \tilde{\psi}_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.46)$$

である。

このように冗長な情報が存在する場合でも、CPS で計測を繰り返した後のロボットの位置同定精度は、各ロボットの移動毎に移動したロボットの種類に応じて式 (4.30),(4.31) 4.41,4.43 で与えられる誤差分散行列、誤差相関行列を順次計算することで導出できる。また、本手法を用いて求められた同定位置は、著者らが提案した冗長位置情報の融合手法 [148] と同一のものであり、観測方程式 (4.4) ~ (4.12) から求められるロボット 0 の位置の最尤推定値となる。

4.4 デッドレコニング法との比較実験

まず試作した CPS-II の基本的な位置同定精度を確認するため、1 台の親ロボットと 2 台の子ロボットを用いて、親ロボットの位置がただ 1 つ定まり、冗長な位置情報が存在しない場合の位置同定精度の測定実験を行なった。実験では、これら 3 台のロボットをカーペットの敷かれた平坦な室内 (6m × 12m) の壁に沿って、CPS による位置同定を行ないながら時計回りに一周させ、再び初期位置に到達した時点での親ロボットの同定位置と定点計測により測定される親ロボットの位置を比較して移動後の同定精度を調べた。このときの各ロボットの移動の様子を Fig. 4.10 に示す。図では、親ロボットは四角、子ロボットは丸で表されており、各ロボットは左下に示す逆三角形状を成す初期配置から y 軸方向へ移動を開始し、Fig. 4.1 に示す動作サイクルを 11 回繰り返した後、再び初期位置へ到達している。図中の実線で示された親ロボットの移動終了時の x, y, z , および z 軸回りの方位角 θ の平均同定誤差を Table 4.3 に示す。このときの親ロボットの総移動距離 21.5m に対し、 z 軸方向 (高さ方向) の誤差も含んだ平均位置同定誤差は 59.2mm (移動距離の 0.28%)、姿勢同定誤差は 0.27 度であった。

次に比較のため、親ロボットの駆動輪に 47,520 パルス／回転のエンコーダを取り付け、ロボットを単純に直線的に移動させた場合のデッドレコニング法の位置同定精度を計測したところ、同定精度は移動距離の 1.4% であった。また CPS と同様の移動指令を与えて、デッドレコニング法のみで移動させた結果は、Fig. 4.10 中に破線で示す軌道の様になった。このように方向転換を含むデッドレコニング法の位置同定では、方位誤差の影響ではるかに大きい数 10 % の誤差が生じてしまうことがわかった。

Table 4.3: Positioning and attitude accuracy of CPS-II after robot 0 moves with the distance of 21.5m

Δx	Δy	Δz	Average	$\Delta \theta$
40.9	12.6	36.9	59.2 mm	0.27 degree

4.5 冗長位置情報の融合実験

次に提案した冗長位置情報の融合手法の有効性を検討するために、1台の親ロボットと3台の子ロボットを用いた移動測定実験を行ない、冗長な位置情報を利用する場合と利用しない場合について実現される位置同定精度を比較した。実験では、これら4台のロボットを用いて、前項の移動測定実験と同一の環境内をCPSによる位置同定を行ないながら移動させ、このうち親ロボットを含む3台のロボットだけを位置同定に利用した場合と、4台全てのロボットを利用し、冗長な位置情報を提案した手法で融合した場合について位置同定計算を行ない、両者の移動後の位置同定精度を比較した。

実験の様子をFig. 4.11に、各ロボットの移動の様子をFig. 4.12に、また各動作サイクルにおけるロボットの移動手順をFig. 4.13に示す。図では、親ロボットは四角、子ロボットは丸で表されており、各ロボットは左下に示す扇形の初期配置から y 軸方向へ移動を開始し、Fig. 4.13に示す動作サイクルを11回繰り返した後、再び初期位置へ到達している。Fig. 4.12中の実線で示された親ロボットの移動終了時の位置および z 軸回りの方位角 θ の平均同定誤差を、ロボットを3台用いた場合、ロボットを4台用いて提案する手法により位置情報を融合した場合、ロボットを4台用いて冗長な位置情報の算術平均を計算することにより各位置情報を融合した場合について、測定10回の平均値をTable 4.4に示す。

このように親ロボットの総移動距離 21.5m に対し、平均位置、姿勢同定誤差はロボットが3台だけで冗長性が無い場合が一番大きく、ロボットを4台用い、提案した冗長な位置情報の融合手法を用いた場合は、それぞれ 26.3mm(相対精度0.12%)、0.32度と最も良い結果となった。またロボットを4台用い、算術平均を用いた場合にはそれらの結果の中間的な誤差となった。これらの実験から、提案するような冗長位置情報の融合によって、位置姿勢同定精度が向上できることが確認された。

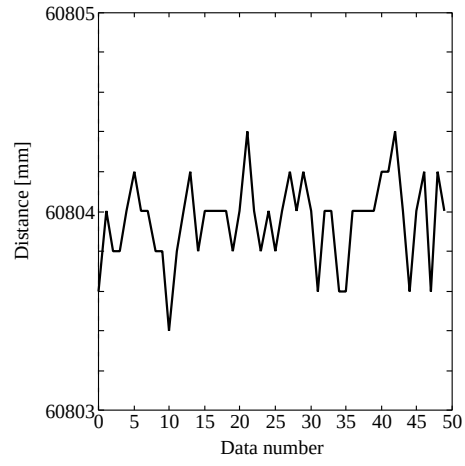
Table 4.4: Positioning and attitude accuracy of CPS-II with 3 and 4 robots for the motion of Fig. 4.12. Positioning error ratios are also shown.

	Position	Attitude
3 robots	67.9mm (0.32%)	0.43 deg.
4 robots		
Proposed method	26.3mm(0.12%)	0.32 deg.
4 robots		
Arithmetic means	53.0mm(0.25%)	0.83 deg.

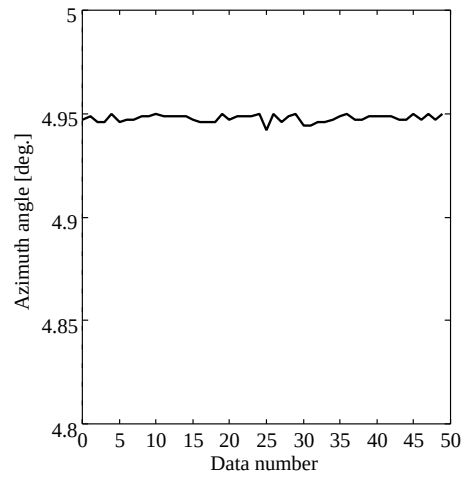
4.6 まとめ

本章では、多数台のロボットを用いることにより得られる複数冗長な位置情報を、重みつき最小二乗法により融合することで、位置同定精度を向上させる手法を示した。また試作した第二次CPS機械モデル(CPS-II)及び移動測定実験の様子を紹介し、本機械モデル

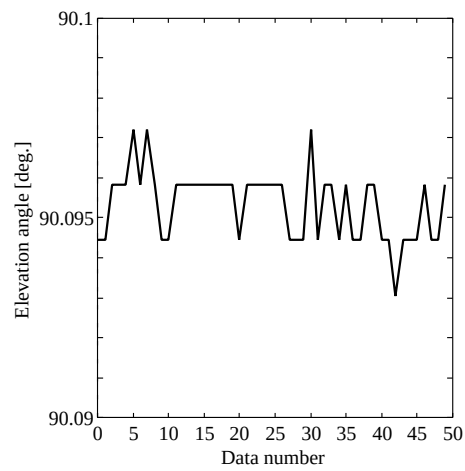
によりデッドレコニング法と比較してはるかに高精度な位置同定が実施できること，また提案した情報融合手法によれば，群ロボットからの冗長な位置情報が利用でき，位置同定精度がより向上することを示した．



(a) Distances

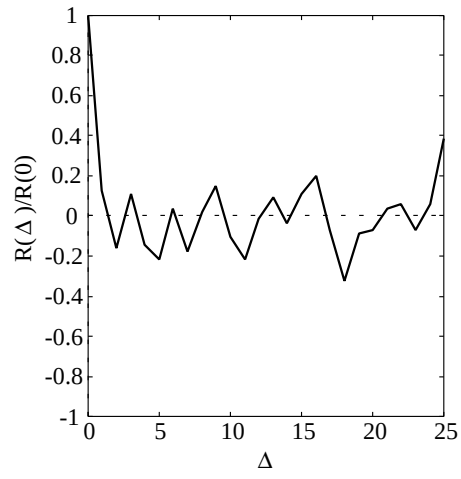


(b) Azimuth angles

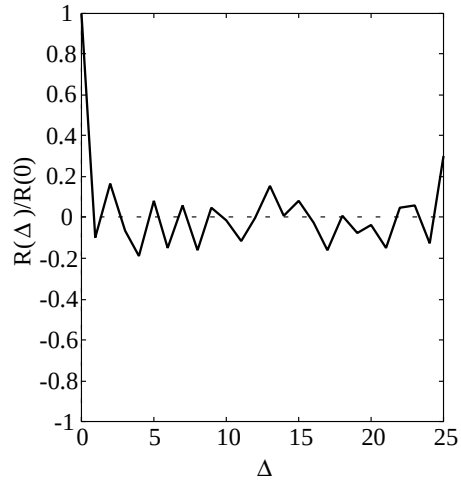


(c) Elevation angles

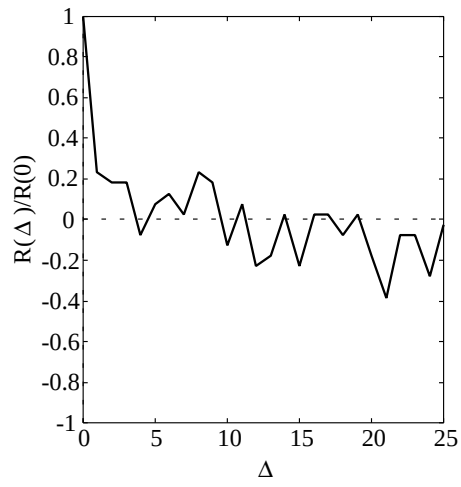
Figure 4.6: Measured distances, azimuth, and elevation angles



(a) Distances

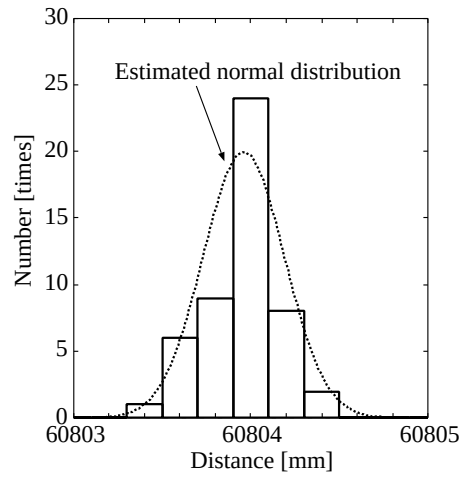


(b) Azimuth angles

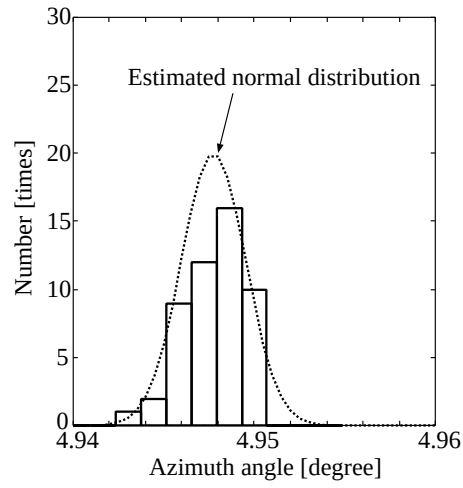


(c) Elevation angles

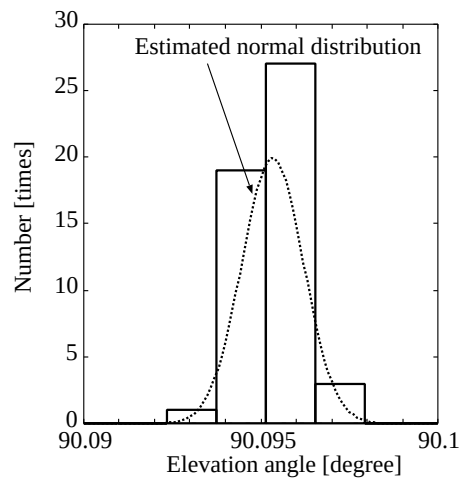
Figure 4.7: Distribution of measured distances and angles



(a) Distances



(b) Azimuth angles



(c) Elevation angles

Figure 4.8: Distribution of measured distances and angles

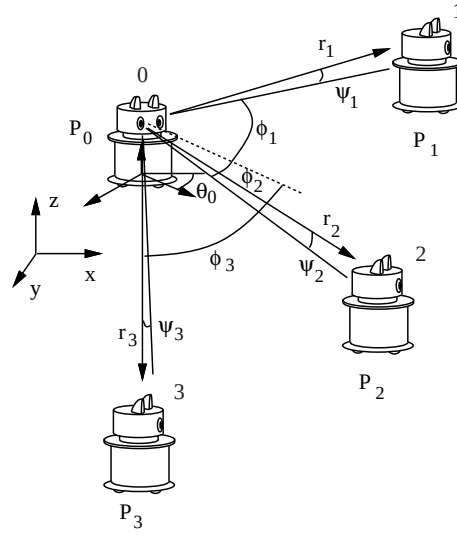


Figure 4.9: Example of position calculation.

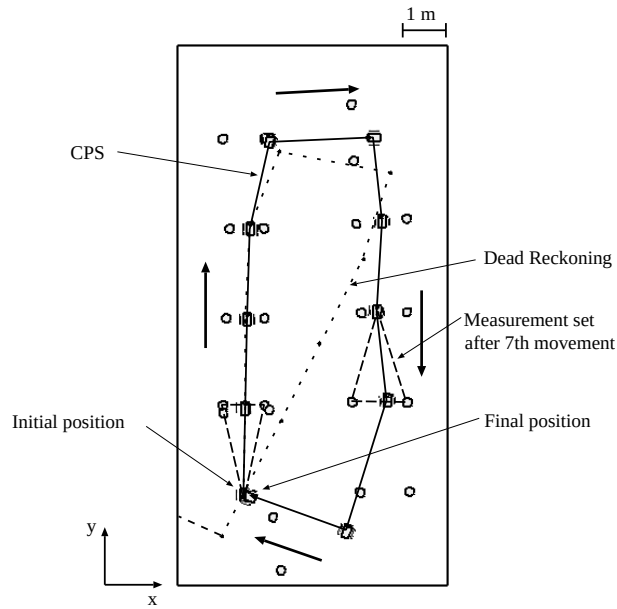


Figure 4.10: An example of the experimental results with 3 robots.

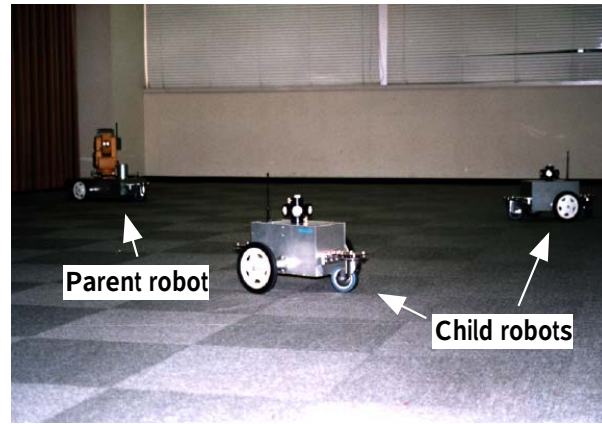


Figure 4.11: Example of measurement experiments.

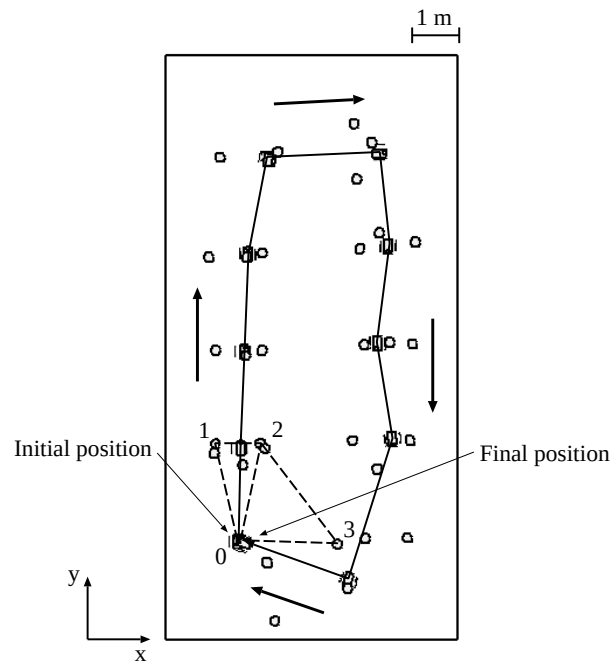


Figure 4.12: An example of the experimental results with 4 robots.

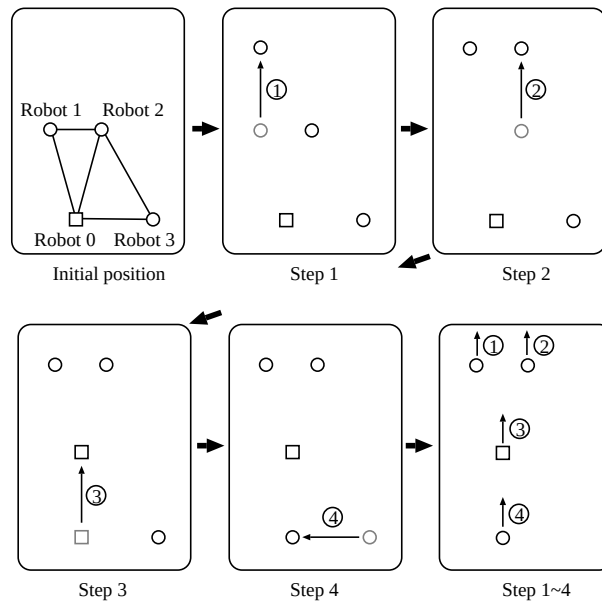


Figure 4.13: Moving strategy in each measurement cycle.

第5章 最適化移動形態の検討

第3章でも指摘したように、CPSは移動とともに蓄積する位置同定誤差は、CPSを構成する各ロボットの移動形態によって大きく変化する。従って誤差の蓄積を押さえ、位置同定精度の低下を防ぐ最適化された移動形態の導出は、CPSを実用化する上で必要不可欠である。そこで本章では、様々なCPSの実現形態のうち、特にレーザ距離計測装置を利用した第三次機械モデルCPS-IIIに対して、累積誤差の基本的性質を解明し、累積誤差を最小化する最適化された移動形態を誘導する。

5.1 第三次機械モデルCPS-III

CPS-IIIは第4章で紹介した第二次機械モデルCPS-IIをベースとし、Fig. 5.1, 5.2に示すように新たに設計した4輪独立駆動型の車体にDCモータ(親ロボット190W x 2, 子ロボット90W x 2, 日邦電気製)、モータ駆動回路(TITech Moter Driver)などを搭載し、屋外での運用が可能のようにCPS-IIに比べて走行システムを強化したモデルである。従っ

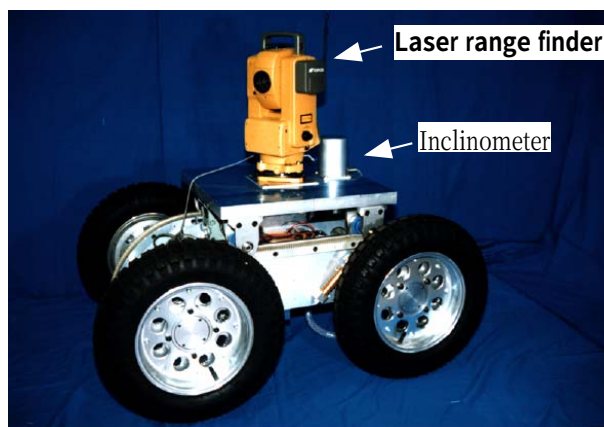


Figure 5.1: Parent robot of CPS-III

て、親ロボットに搭載したレーザ距離計測装置(AP-L1,(株)トプコン製)、2軸傾斜計センサ(CMS-05A-XY, 桑野電機(株)製)、マイクロコンピュータ、バッテリー、無線システム、及び子ロボットに搭載したコーナーキューブとその配置はCPS-IIと同様である。またすべてのロボットには筆者らがこれまでに提案したRC揺動機構を採用し、傾斜地においてもレーザ距離計測装置やコーナーキューブが水準面に対して平行になるようにしている。

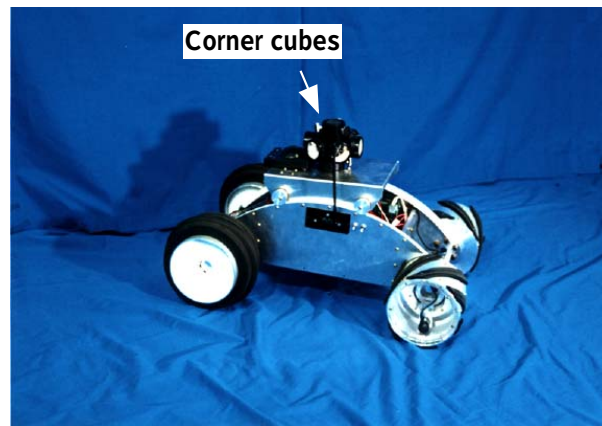


Figure 5.2: Child robot of CPS-III

5.2 CPS-IIIの最適化移動形態

本項では，第三次機械モデル CPS-III の移動形態と位置同定精度の関係を計算機シミュレーションおよび解析的手段によって検討し，位置同定精度を評価基準とした最適な移動形態を明らかにしていくことにする．

5.2.1 前提条件

以降の考察においては，以下の前提条件を設定する．

1. 計測器を搭載した1台の親ロボットとコーナキューブを搭載した2台の子ロボットからなる基本システムを対象とする．
2. 各ロボットは重力方向に対する自己の姿勢（Roll,Pitch 角）を計測できる正確な姿勢センサを搭載しているものとする．
3. 水平面上の二次元位置同定問題を考える．
4. 計測器の誤差は「第 4.2 章 レーザ距離計測装置の計測誤差特性」で実験的に明らかにしたように，
 - 測角，測距誤差は中心 0 のガウス分布に従う．
 - 測距，測角誤差の分散値は，計測距離，角度によらずある一定値である．

とする．

さらに具体的なシミュレーションのための前提条件として，以下を想定する．

1. 計測器は 4.2 節で示す特性を有するものとし，具体的には測距精度を標準偏差 3mm，測角精度を標準偏差 5 秒とする．

2. 各ロボットは1km先に設定された各々の目標位置に向けて、直線的に移動距離10mずつ交互に100回移動する運動を想定する。
3. 位置同定精度の大きさは、各ロボットが移動、測定を繰り返す毎に式(4.30),(4.31)で与えられる誤差分散行列、誤差相関行列を計算し、目標位置に到達した時点での親ロボットの位置分散行列のうち、その位置成分のトレースで与えられるものとする。
4. ロボットの進行方向は **Fig. 5.3** に示すように y 軸にとり、親子ロボット間距離を r_1, r_2 、親ロボットからみた子ロボットの方位角を ϕ_1, ϕ_2 とする。

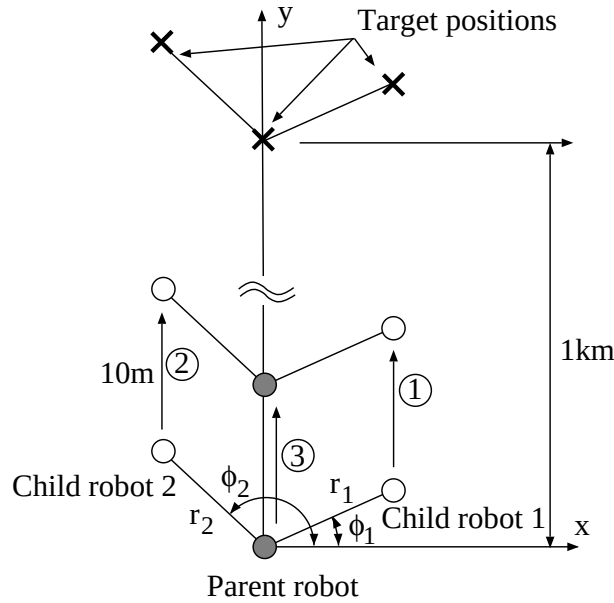


Figure 5.3: Simulation model.

5.2.2 シミュレーション解析

まずある1つの移動形態 (r_1, r_2, ϕ_1, ϕ_2 の組) を目標位置まで繰り返す場合を考え、ロボット間距離 r_1, r_2 を0~1000mで10等分、角度 ϕ_1, ϕ_2 を0~360度で18等分した、合計32,400点を初期値として、Newton法により位置同定誤差を最小にする移動形態を求めた。その結果、それらは **Table 5.1** に示す3つの解のいずれかに収束し、移動後の同定誤差を最小化する移動形態としてA,B,Cの3つの局所解が存在することがわかった。このうち **Fig 5.4** に示すように、解A,Bはロボットの進行方向に対して左右対称に子ロボットを配置する場合であり、解Aはすべてのロボットが進行方向に対して垂直にほぼ横一線に並ぶ配置、解Bは親ロボットから子ロボットへの方角が45~55[deg.]となる配置である。これらをそれぞれ最適化移動形態A,Bとする。また解Cは進行方向の前後にロボットを配置する場合であり、これを最適化移動形態Cとする。

Table 5.1: Optimum robots configurations.

	$r_1[m]$	$r_2[m]$	$\phi_1[deg.]$	$\phi_2[deg.]$	$\sigma_x^2 + \sigma_y^2$
A	80.3	80.3	3.0	176.1	0.0203
B	528.2	518.0	53.1	126.3	0.0218
C	72.7	106.2	89.6	-90.5	0.0207

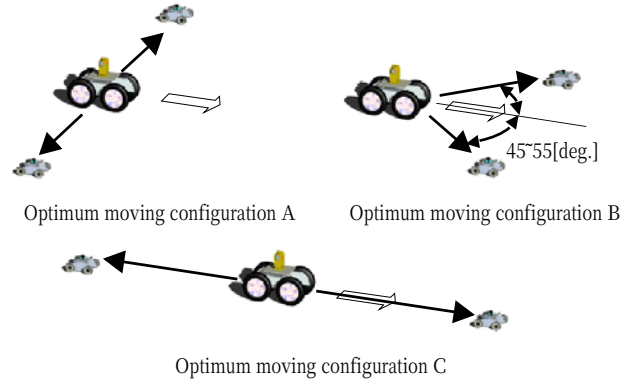


Figure 5.4: Optimum moving configurations.

次に2つの異なる移動形態を交互に繰り返す場合を考え、 r_1, r_2, ϕ_1, ϕ_2 等の変数を連続する2つの移動形態に与え、Newton法により初期値を様々に変えて位置同定誤差を最小にする連続する2つの移動形態を求めた。計算結果の一例を **Table 5.2** に示す。このように、2つの移動形態を交互に繰り返す場合にも、**Fig. 5.4** で示された最適化移動形態 A,B,C を組み合わせるという結果が得られることがわかった。これらの実験結果から、前述の A,B,C の最適化移動形態は最適性の高いものであることが推定できるので、以降はこれら3つの最適化移動形態に対して誤差方程式を導出し、それぞれの誤差発生メカニズムを明らかにしていくことにする。

5.3 各最適化移動形態における誤差解析解の導出

第2章で示したように、ロボット群がある距離移動した後の位置同定精度は、式 (4.30),(4.31) で与えられる誤差分散行列、誤差相関行列を用いた一連の漸化式として記述できるが、一般的にはこの漸化式の解の誘導は困難である。しかし前項の計算機実験で得られた最適化移動形態 A,B,C は、式 (4.20) で与えられる観測方程式の各項が単純化できるため、これら漸化式を解析的に解け、誤差解析がしやすいという特徴を有する。本節では最適化移動形態 A,B,C のこのような特性を論じ、それぞれの移動形態の誤差発生メカニズムを考察する。

Table 5.2: Optimum robots configurations in case that two moving patterns are repeated.

	$r_1[m]$	$r_2[m]$	$\phi_1[deg.]$	$\phi_2[deg.]$	$\sigma_x^2 + \sigma_y^2$
A $\rightarrow$ A	80.6	77.6	-2.3	171.3	0.0204
	74.1	82.2	161.3	347.3	
A $\rightarrow$ B	77.1	80.7	9.9	183.4	0.0210
	514.1	524.4	126.4	53.0	
C $\rightarrow$ C	106.8	73.2	270.2	90.2	0.0207
	72.0	105.1	89.5	269.3	
C $\rightarrow$ A	73.2	106.8	89.6	-90.5	0.0205
	80.9	78.8	-0.8	172.5	

5.3.1 各最適化移動形態の誤差解析解

最適化移動形態 A,B に対する移動後の位置同定誤差の解析解を付録 A-1 に示す. これは Fig 5.5 に示すように, 親ロボットの位置を (x, y) , 子ロボットの位置をそれぞれ $(x+d, y+h)$, $(x-d, y+h)$ とし, 各ロボットが y 軸方向に交互に距離 l ずつ移動する場合の, 親ロボットの移動 n 回目の誤差分散行列を示したものである.

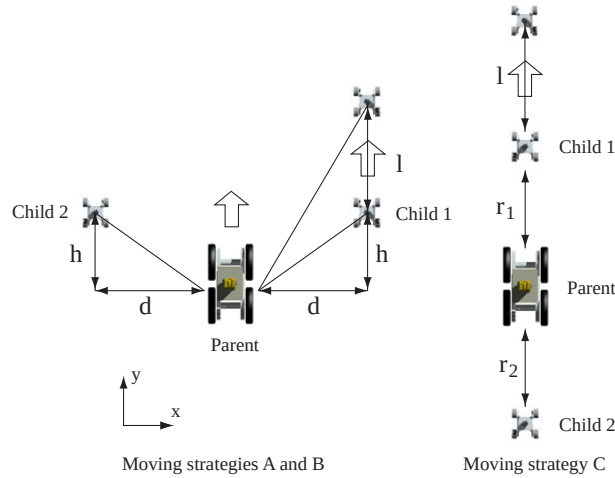


Figure 5.5: Definition of moving parameters

式 (A.9),(A.10) を用いて, 親子ロボット間の相対位置関係を表すパラメータ d, h を様々な変化させたときの, 移動回数 $n = 100$ 回目の誤差分散行列の大きさ ($Tr(\Sigma) = \sigma_{x,n}^2 + \sigma_{y,n}^2$) を求めた結果を Fig 5.6 に示す. また, Fig 5.6 において, 誤差分散行列の大きさが極小となる 2 つの d, h の組を Table 5.3 に示す. これらはそれぞれ最適化移動形態 A,B に対応している.

同様に最適化移動形態 C に対する移動後の位置同定誤差の解析解を付録 A-2 に示す. これは Fig 5.5 に示すように, 子ロボットを親ロボットの前後方向に距離 r_1, r_2 離して配置

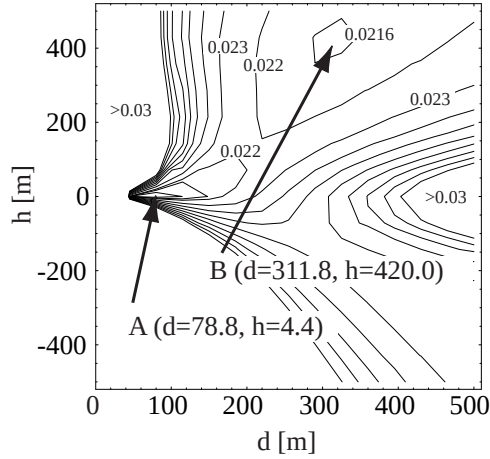


Figure 5.6: Values of error variances for optimum moving strategies A and B

Table 5.3: Optimum configurations of moving strategies A and B.

	$d[m]$	$h[m]$	σ_x^2	σ_y^2	$\sigma_x^2 + \sigma_y^2$
A	78.8	4.4	0.0200	0.0004	0.0204
B	311.8	420.0	0.0202	0.0013	0.0216

し、各ロボットが y 軸方向に交互に距離 l ずつ移動する場合の、親ロボットの移動 n 回目の誤差分散行列を示したものである。

また式 (A.18),(A.19) から、親子ロボット間の相対距離 r_1, r_2 を様々に変化させたときの、移動回数 $n = 100$ 回目の誤差分散行列の大きさ ($Tr(\Sigma) = \sigma_{x,n}^2 + \sigma_{y,n}^2$) を求めた結果を Fig 5.7 に示す。また Fig 5.7 において、誤差分散行列の大きさが最小となる r_1, r_2 を Table 5.4 に示す。

Table 5.4: Optimum configurations of moving strategie C.

	$r_1[m]$	$r_2[m]$	σ_x^2	σ_y^2	$\sigma_x^2 + \sigma_y^2$
C	63.2	90.8	0.0198	0.0009	0.0207

5.3.2 各最適化移動形態の誤差発生メカニズム

前項で示した各最適化移動形態に対する誤差解析解をもとに、それぞれの誤差発生メカニズムを明らかにし、CPS-III に対する最適な移動シーケンスについて検討する。

まず最適化移動形態 A,B の一例として $h = 0$ (方位角 $\phi = 0[deg.]$)、および $d = h$ (方位角 $\phi = 45[deg.]$) を考え、簡単のため式 (A.9),(A.10),(A.13) の移動距離 l を 0 とおくと、 n

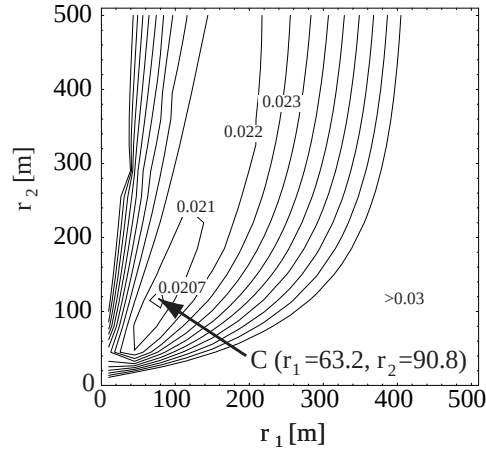


Figure 5.7: Values of error variances for optimum moving strategy C

回移動後の親ロボットの位置同定誤差は、最適化移動形態 A に対して

$$\sigma_{x,n}^2 = n\sigma_r^2 \quad (5.1)$$

$$\sigma_{y,n}^2 = nd^2\sigma_\phi^2 \quad (5.2)$$

$$\rho_{xy,n} = 0 \quad (5.3)$$

また、最適化移動形態 B に対して

$$\sigma_{x,n}^2 = 2n\sigma_r^2 \quad (5.4)$$

$$\sigma_{y,n}^2 = n \frac{4d^2\sigma_r^2\sigma_\phi^2}{\sigma_r^2 + 2d^2\sigma_\phi^2} = n \frac{2}{\frac{1}{2d^2\sigma_\phi^2} + \frac{1}{\sigma_r^2}} \quad (5.5)$$

$$\rho_{xy,n} = 0 \quad (5.6)$$

となる。また最適化移動形態 C に対しても同様に、

$$\sigma_{x,n}^2 = \frac{4nr_1^2r_2^2}{(r_1 + r_2)^2}\sigma_\phi^2 \quad (5.7)$$

$$\sigma_{y,n}^2 = n\sigma_r^2 \quad (5.8)$$

$$\rho_{xy,n} = 0 \quad (5.9)$$

となる。これらより、子ロボット間の方位角がほぼ 180 度となる最適化移動形態 A,C では、測定器の測距、測角値をそれぞれ独立して各方向の位置同定に用いているのに対し、方位角が 90 度となる最適化移動形態 B では測定器の測距、測角値を干渉させて位置同定を行っていることがわかる。この結果、最適化移動形態 A,C では、ロボット間距離 d や r_1, r_2 が長くなるほど測角誤差に起因する誤差成分の影響が大きくなり同定誤差が増大するが、最適化移動形態 B では、 $d \rightarrow \infty$ としても、測距誤差と測角誤差が干渉し合い、同定誤差は $\sigma_{x,n}^2 + \sigma_{y,n}^2 = 4n\sigma_r^2$ 以上にはならないことが予想できる。

最適化移動形態とロボット間距離

上述したように、最適化移動形態 B ではロボット間距離が長くなり測角誤差に起因する誤差成分が増加しても、測距誤差と測角誤差が干渉し合い、同定誤差がそれほど増大しないことが考えられる。そこで各最適化移動形態に対して、ロボット間距離を変化させた場合の移動後の位置同定誤差を計算した結果を Fig. 5.8 に示す。これより予想された通り、

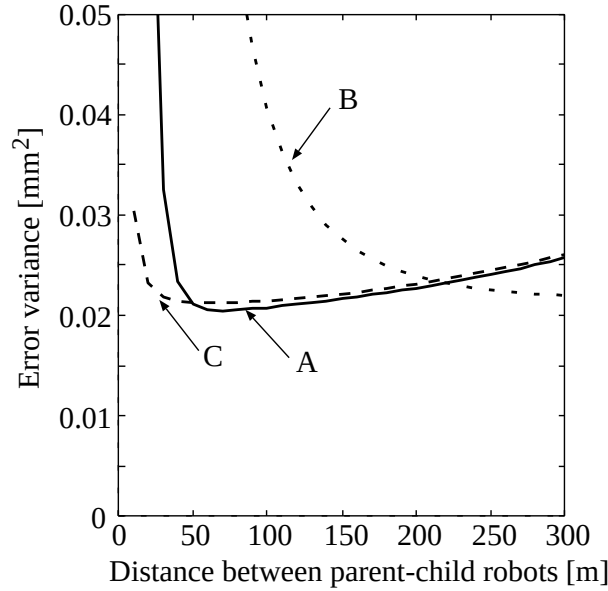


Figure 5.8: Variation of positioning error of basic moving strategies A,B, and C.

ロボット間距離が短く測角誤差の影響が小さい場合には、最適化移動形態 A,C を用いることで精度良く位置が同定でき、広い範囲を移動する場合などロボット間距離が長い場合には、計測器の測角誤差の影響を押さえることができる最適化移動形態 B が有利になることがわかる。

測定器の測距、測角誤差と最適化移動形態

Table 5.3 より、最適化移動形態 A,B とも x 軸方向の誤差は y 軸方向に比べて 10～60 倍であり、 x 軸方向の誤差が同定誤差の主要因となっている。さらに式 (A.9) に式 (A.4),(A.5) を代入し、測定器の測距、測角誤差 $\sigma_r^2, \sigma_\phi^2$ について整理すると、移動後の x 軸方向の誤差分散は次式で表される。

$$\sigma_{x,n}^2 = n \frac{12d^6 + \dots + 12h^2}{12d^2 L_1^2 L_2^2} \sigma_r^2 + \frac{nl^2(2n^2 + 1)}{6} \sigma_\phi^2 \quad (5.10)$$

これは x 軸方向の誤差は、測定器の測距誤差 σ_r^2 に起因する右辺第一項と測角誤差 σ_ϕ^2 に起因する第二項に分けられ、さらに測定器の測角誤差に起因する第二項は、一回の移動距離 l と移動回数 n によって決まり、 d, h など群の移動形態を決定するパラメータは全く影響しないことを示している。これらより最適化移動形態 A,B を用いた場合、計算例のように x

軸方向の同定誤差が y 軸方向に比べて十分大きい場合には、最適な移動形態とは式 (5.10) 右辺第一項の計測器の測距誤差の係数をできるだけ小さくする移動形態であること、すなわち最適なロボット配置は測定器の測距、測角精度に無関係に **Table 5.3** で与えられることがわかる。

また最適化移動形態 C についても、同様に式 (A.18) に式 (A.16), (A.17) を代入し、 r_1, r_2 等の移動形態を表すパラメータについて整理すると、移動後の x 軸方向の誤差分散は次式で表される。

$$\begin{aligned} \sigma_{x,n}^2 = & n \frac{l^4(2n-1)(n-1) + \dots + 12r_1^2 r_2^2}{3(r_1 + r_2)^2} \sigma_\phi^2 \\ & + \frac{nl^2(2n^2 + 3n - 2)}{6} \sigma_\phi^2 \end{aligned} \quad (5.11)$$

これより最適化移動形態 C に対しても、測定器の測角誤差に起因し r_1, r_2 等の移動形態を表すパラメータには影響されない、同定精度の上限値が存在することがわかる。また最適化移動形態 A, B と同様に、 x 軸方向の同定誤差が y 軸方向に比べて十分大きい場合には、最適なロボット配置は測定器の測距、測角精度に無関係に **Table 5.4** で与えられることがわかる。

5.4 最適化移動形態の検証実験

5.4.1 屋外長距離移動測定実験

まず試作した CPS-III の基本性能を確認するために、起伏のある屋外環境において長距離移動実験を行い、CPS による位置同定精度を測定した。実験の様子を Fig. 5.9 に示す。実験は東京工業大学内の平坦な公道と起伏のある傾斜地において行った。

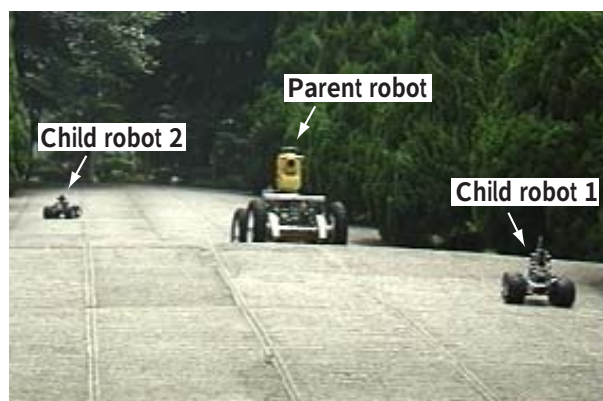


Figure 5.9: Experiment of log distance measurement.

平坦地での長距離移動実験

まず平坦な屋外環境で移動測定実験を行った。測定された親ロボットの移動軌跡を Fig. 5.10 に示す。親ロボットの総移動距離は 277.1[m] であり、途中 Fig. 4.1 に示す 9 回の CPS 動作を行っている。本実験では、CPS は姿勢センサ及び仰角の測定値を用いて高さ方向も含む三次元位置同定を行っており、移動中の最大高低差は 2.3[m] であった。さらに移動開始前に測定した固定点を移動終了後に再び観測し、移動後の CPS の同定精度を求めた結果を Table 5.5 に示す。このように高さ方向も含む三次元位置同定誤差は 450.7[mm]（移動距離の 0.16%）、姿勢同定誤差は 0.12[deg.] であった。

Table 5.5: Experimental results of long distance movements on even surfaces

Distance of movement	Error	
	Position	Attitude
277.1 [m]	450.7 [mm] (0.16 %)	0.12 [deg.]

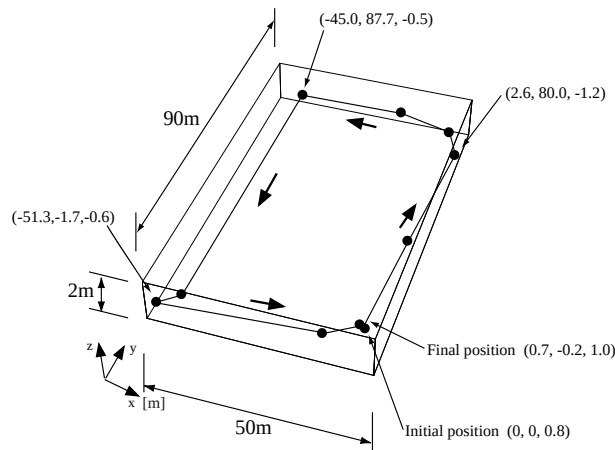


Figure 5.10: Experiments of long distance movements on even surfaces

傾斜地での長距離移動実験

次に起伏のある傾斜地で同様の実験を行った。親ロボットの移動軌跡を Fig. 5.11 に、移動後の位置同定誤差を Table 5.6 に示す。親ロボットの総移動距離は 323.9 [m]，最大高低差 10.2[m]，高さ方向も含む三次元位置同定誤差は 976.3[mm]（移動距離の 0.30%）姿勢誤差は 0.40[deg.] であった。同定精度が平坦な環境での実験に比べて低い一因として、傾斜面でのコーナキューブの見え方の変化や姿勢センサの測定誤差等が考えられる。

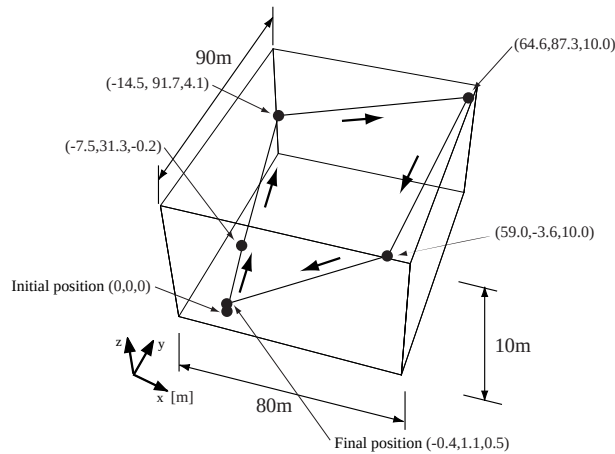


Figure 5.11: Experiments of long distance movements on uneven surfaces

5.4.2 最適化移動形態の検証実験

提案した最適化移動形態の有効性を検討するために、ほぼ平坦な屋外環境において位置同定精度の測定実験を行なった。実験は前章で示した最適化移動形態 A,C, 及び Fig. 5.12

Table 5.6: Experimental results of long distance movements on uneven surfaces

Distance of movement	Error	
	Position	Attitude
323.9 [m]	976.3 [mm] (0.30 %)	0.40 [deg.]

に示す比較のための移動形態 D の 3 つの移動形態に対して行い、同一の相対位置関係をできるだけ保ったまま 5m ずつ前進 5 回後退 5 回の移動を行ない、初期位置に到達した時点での親ロボットの同定精度を固定点の観測により求めた。実験の様子を **Fig. 5.13** に示す。

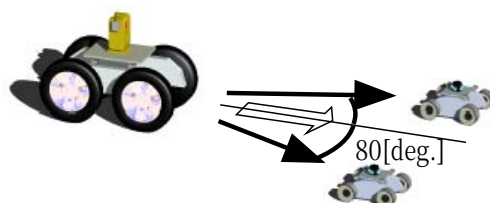


Figure 5.12: Moving strategie D for experiments.

各移動形態に対して実験を 10 回繰り返した時の平均同定誤差と測距誤差 3mm, 測角誤差 5 秒のときの誤差解析解を **Table 5.7** に示す。これより最も位置同定精度の高い最適化移動形態 C では 42m 移動後の位置同定誤差の平均が 28.8mm(移動距離の 0.07%) であり、高い位置同定精度が実現できることを確認した。また最適化移動形態 A,C は、比較のための移動形態 D に比べて位置同定精度が高いこともわかり、提案した最適化移動形態の有効性が確認できた。

5.5 まとめ

本章では、様々な CPS の実現形態のうち、特にレーザ距離計測装置を利用した第三次機械モデル CPS-III に対して、移動後の同定精度を評価基準とする機械モデル CPS-III の最適な移動形態をシミュレーション実験及び解析的手法によって検討し、3 種類の基本的な移動形態があることを誘導した。また第三次機械モデルを用いた屋外環境における精度測定実験を行い、提案した最適化移動形態により他の移動形態に比べて高い位置同定精度が

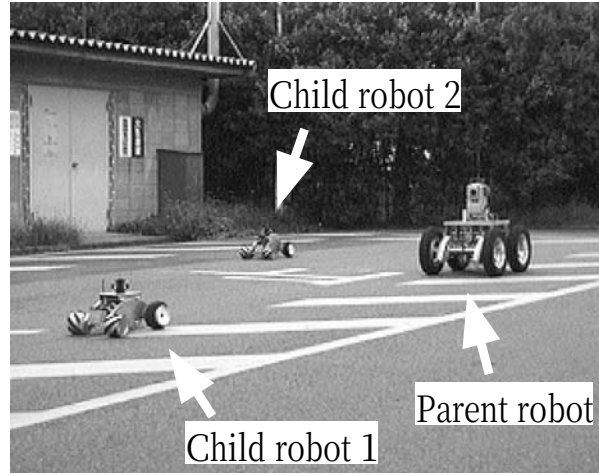


Figure 5.13: Experiments for optimum moving strategies

Table 5.7: Positioning accuracy for optimum moving strategies.

	experiment		theory	
	$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} [mm]$	σ_θ [deg.]	$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} [mm]$	σ_θ [deg.]
A	66.5	0.401	22.9	0.054
C	39.4	0.080	9.8	0.005
D	183.9	1.220	100.6	0.260

得られることを確認した。提案した最適化移動形態の妥当性を確認した。CPSを応用していくに当たっては、各ロボットをどのような移動パターンで動かしていくべきかを決定することは1つの重要なポイントとなるが、本章で提案した移動形態はその基本的特性を具体的に解明したものであるということが出来る。

第6章 CPSの応用例

本章ではCPSに関して前章までに得られた知見を基に、CPSを具体的な用途に使用する例として「CPS アクティブタッチ融合型環境地図作成法」、および「CPS 床面自動清掃作業システム」の2つの応用例を紹介し、CPSを実用化する上で今後解決すべき問題点と課題を検討していくことにする。

6.1 CPS アクティブタッチ融合型環境地図作成法

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。

地図情報を効率良く獲得する典型的な方法は、作業を開始するに当たってまず計測用移動ロボットを環境内を巡回させ、対象とする環境全体を計測しながら、その移動ロボットによって自動的に環境地図を作成するものであろう。

Elfes [24] や Beckerman [34] は、環境を格子状に分割し (Occupancy Grid), 超音波センサにより得られる距離, 方位情報に含まれる測定誤差がある確率分布に従うとして格子点上で融合することで、障害物による格子点の占有可能性を連続的に導く手法を提案している。さらに Elfes は抽出軸, 分解能軸, 地理軸からなる環境地図の階層構造表現も提案している。Crowley [49] は、超音波センサの測定値から面情報を抽出し、環境地図を作成する手法、及び作成された地図と観測情報の比較によりデッドレコニングによる同定位置を修正する手法を提案した。Chatila [45] はデッドレコニングとレーザレンジファインダにより未知空間での位置同定と環境地図作成を行なうシステムを提案している。

これら自動化された地図生成手法は、移動ロボットが外部環境を計測するときに共通して、

- 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。

このような地図生成手法によって正確な地図を作成するには、まず (i) における移動ロボット自身の位置同定の高精度化を計らなければならないが、従来から提案されている方法論では必ずしも精度は十分でなかった。なぜなら、車輪回転角等を積分するデッドレコニング法には、車輪の滑りによる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 (例えば [57], [32] [49], [45]) 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く、やはり誤差が蓄積しやすかったからである。

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。これらの手法は計測対象に直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るが、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、などの問題点を残していた。

そこで本章では、(i)の移動ロボット自身の位置同定には前章までに示した 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。本章では、まず提案する「CPS アクティブタッチ融合型地図生成法」の基本原理解について説明し、次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、センサを用いずメカニカル壁面追従を実現するアクティブタッチ機構を提案する。さらに試作した機械モデルの概要と屋内環境における環境地図の作成実験の様子を紹介する。

6.1.1 CPS アクティブタッチ融合型地図生成法の提案

“アクティブタッチ”方式とは、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。この手法の一例として、Rude [13] はロボット周囲に配置した楕円形のバンパに、1. 衝撃吸収、2. 位置同定精度の低下の抑制だけでなく、3. 人間との簡単なインターフェース、4. 障害物の発見などの機能を持たせることを提案している。また Jung ら [12] はヒゲセンサを用いた壁面追従型清掃ロボットを提案した。今後レーザレンジファインダなどで効率よく環境認識を行う方法論が多用されるものと考えられるが、そのような場合でも階段など従来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と判定される場合などでは、実際に測定対象に近づき接触して計測するというアクティブタッチ方式は、より信頼性の高い手段として使用されることになるであろう。

またアクティブタッチ方式は、単に壁面の位置等を触覚を用いて認識するだけではなく、場合によっては観測対象に力学的な働き掛けを行い、対象の状態を変化させることでより確実な計測を可能にすることも考えられる。例えば移動ロボットの走行地図作成に利用した場合、床面上の小さな空き缶や天井から吊されたカーテンなど従来手法では障害物として計測される対象も、実際にロボットで押してみれば移動させることができれば、それらはロボットの移動に対する障害とはならない。このようにアクティブタッチ方式は、より実際の環境に即した確実な情報を収集することができる可能性があるが、センシングによる環境変化も利用した方法論はこれまで研究されておらず、我々は今後これらについても検討する予定である。

CPS は、移動中に予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. 6.1 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機構を搭載した複数の子ロボットからなる。通常は Fig. 6.1(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. 6.1(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尾し、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論文では取り扱わない。

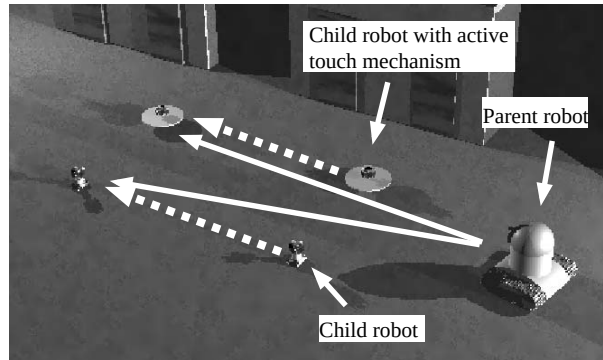
本手法の特長は、長距離の移動時には CPS を用い、環境地図の作成時には静止した親ロボットからアクティブタッチ用ロボットへの観測を利用するため、広範囲の環境地図作成作業でも高い精度が維持できること、アクティブタッチを用いるため信頼性の高い地図作成が可能であること、また CPS で使用するレーザレンジファインダを地図作成に利用するため、新たなセンサの付加が必要ないことなどが挙げられる。

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、また後述する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。

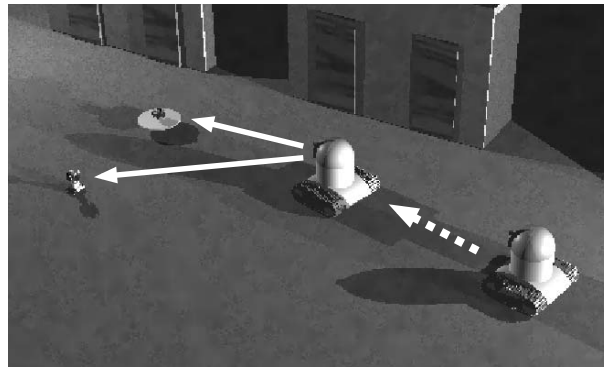
6.1.2 メカニカル壁面追従を行うアクティブタッチ機構

本項では、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. 6.2 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。

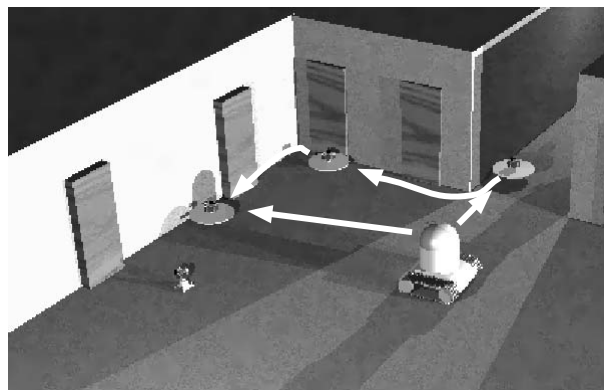
本機構を移動ロボットに取付けることにより、超音波センサ [64] や触覚センサ [12] など一切用いずに凸や凹状の頂点を有する壁面を離れることなく移動する、メカニカル壁面追従動作を実現できる。例えばロボットが壁面に向かって移動し、ある位置で衝突した場合を考える (Fig. 6.3(1),(2))。このときロボットは円板外縁部を接触させながら、自らの



(a) Child robots move and have their positions measured



(b) Parent robot moves and measures its position



(c) Enviromental map is created by active touch

Figure 6.1: Concept of map creation by CPS based active touch

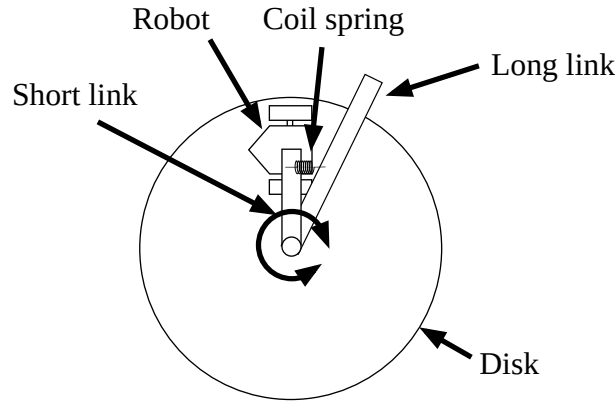


Figure 6.2: Active touch mechanism

推進力により円板軸周りに回転運動を始めるが (Fig. 6.3(3)), 長リンクが壁面に接触し長短リンク間のばね力とロボットの推進力が釣り合った点で, ロボットは回転運動を止めて次の壁面に添った前進運動を始める (Fig. 6.3(4)). このときロボットの方向が常に壁面の内側を向くように, ばね力とリンク長を選択することで, ロボットは壁面から離れることなく走行を続ける. 次に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 (Fig. 6.4(1)), 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. 6.4(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. 6.4(3),(4)). またロボットが凸状の頂点を移動する場合には (Fig. 6.5(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. 6.5(2),(3)), 壁面から離れることなく移動を継続する (Fig. 6.5(4)). さらに, 例えば袋小路に入った場合でも (Fig. 6.6), ロボットは進行方向を 180 度変えて脱出することができる.

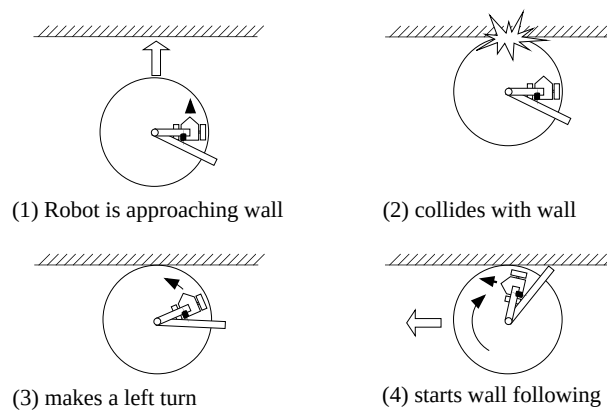


Figure 6.3: Basic principle of wall following behavior

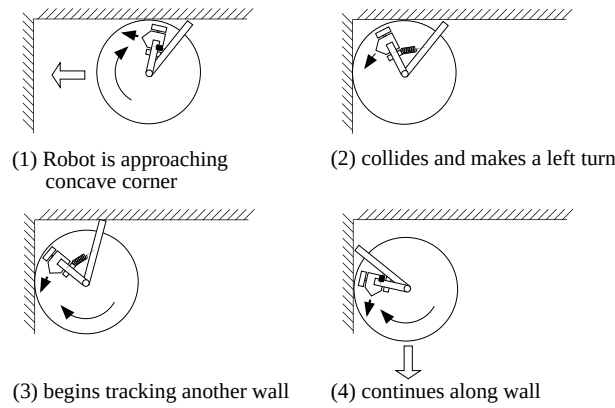


Figure 6.4: Passing concave corner

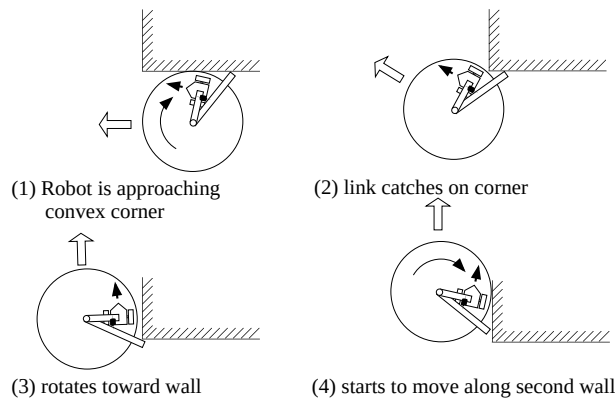


Figure 6.5: Passing convex corner

6.1.3 CPS アクティブタッチ融合型環境地図作成システム

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、環境地図作成実験を行った。アクティブタッチ機構を搭載した子ロボットを Fig. 6.7 に示す。この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、第5章で示した CPS 第三次機械モデル CPS-III 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、

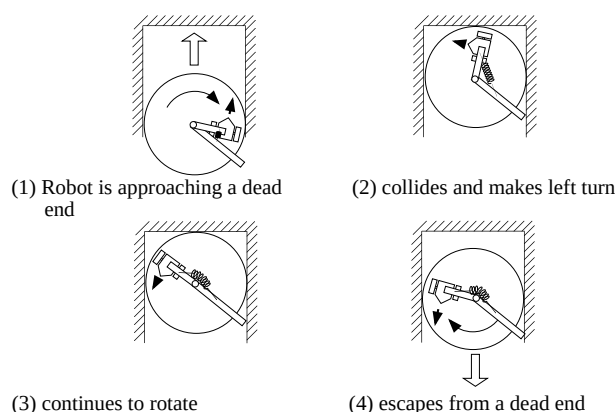


Figure 6.6: Escape from dead end

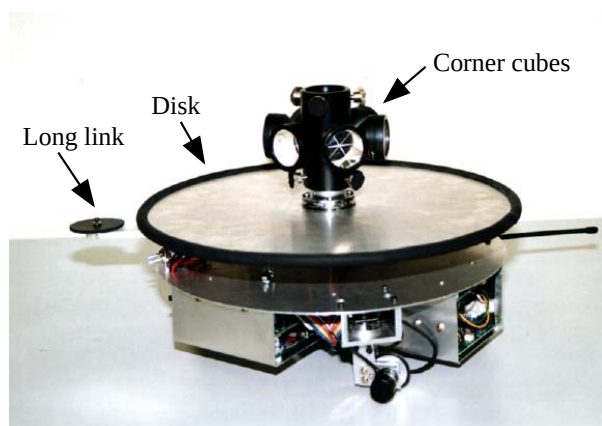


Figure 6.7: Child robot with active touch mechanism

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．

6.1.4 アクティブタッチ機構の動作確認実験

まず提案したアクティブタッチ機構の動作を確認するため，子ロボットの走行実験を行った．実験ではロボットを凸型の障害物に沿ってデッドレコニングにより位置同定を行いながら移動させた．実験結果の一例をFig. 6.8に示す．このように障害物周囲の凸，凹どちらの頂点でも障害物から離れることなく移動でき，提案したアクティブタッチ機構の基本動作が確認できた．また本実験における試作した子ロボットのデッドレコニングの誤差は移動距離 7604 [mm] に対し 390 [mm] であり，同定精度は 5.1 %であることがわかる．

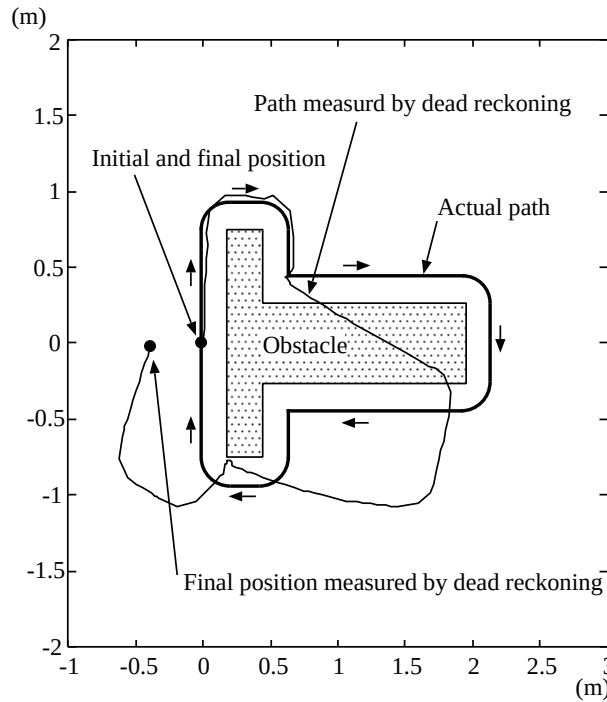


Figure 6.8: Experiment of wall-following motion

6.1.5 屋内環境地図の作成実験

次に Fig. 6.9 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、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、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 Fig. 6.10 に示すように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。

実験の様子を Fig. 6.11 に示す。また実験の結果、CPS の親ロボットによって推定されたアクティブタッチ機構を搭載した子ロボットの軌道を Fig. 6.12 に、CPS-III の各ロボットの移動の様子を Fig. 6.13 に示す。ただし、Fig. 6.12 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、アクティブタッチ機構を搭載した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. 6.14 に、子ロボットの軌道から推定された環境地図を、Table 6.1 にデッド

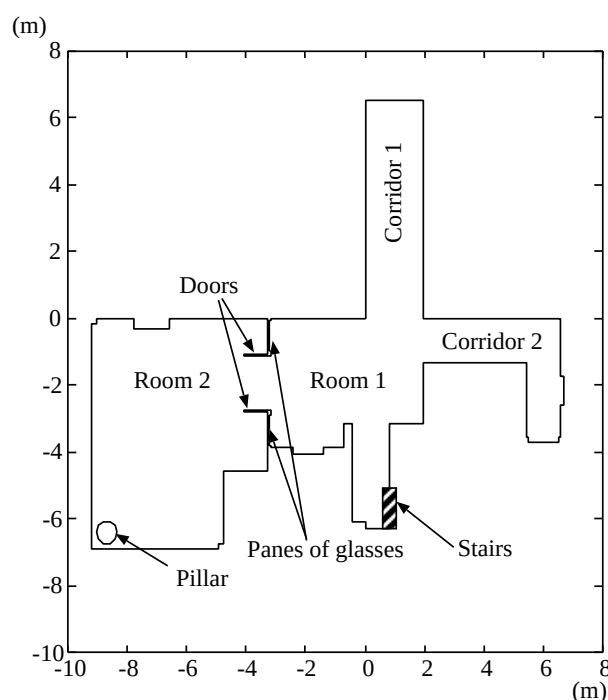


Figure 6.9: Environment for experiments

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ー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。

Table 6.1: Errors of the obtained environmental map

Average	30.8 [mm]
Maximum	178.0 [mm]

6.1.6 まとめ

本章では、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

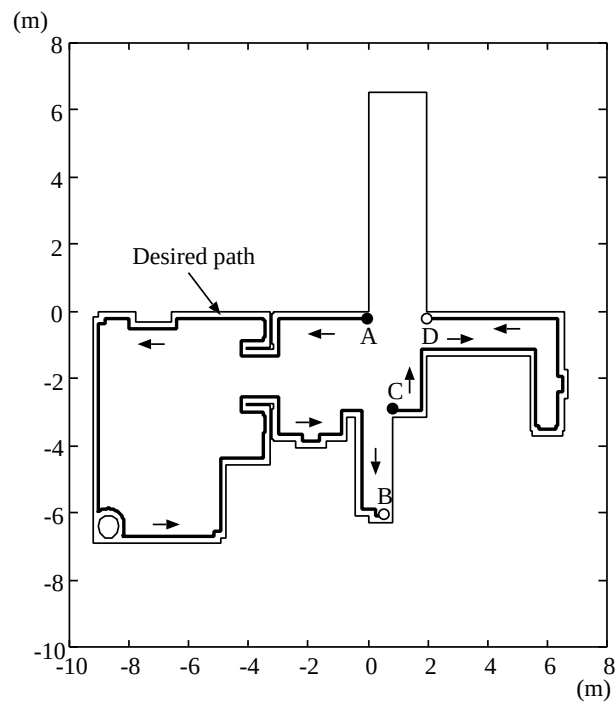


Figure 6.10: Desired paths for wall-following robot

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．

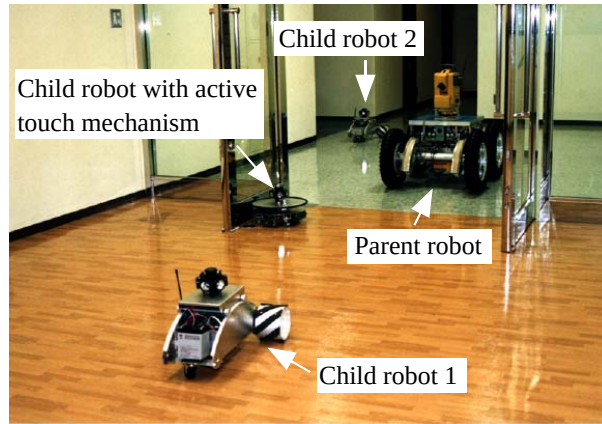


Figure 6.11: Experiment of map creation

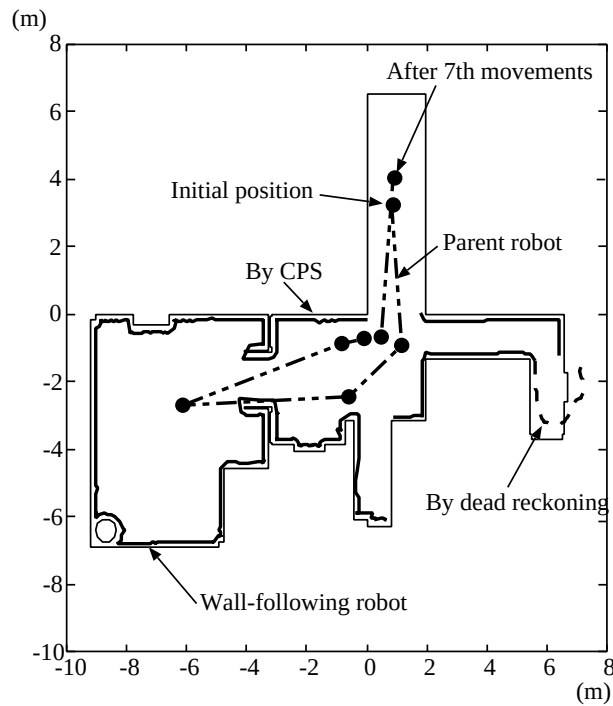


Figure 6.12: Paths of wall-following robot and parent robot measured by CPS

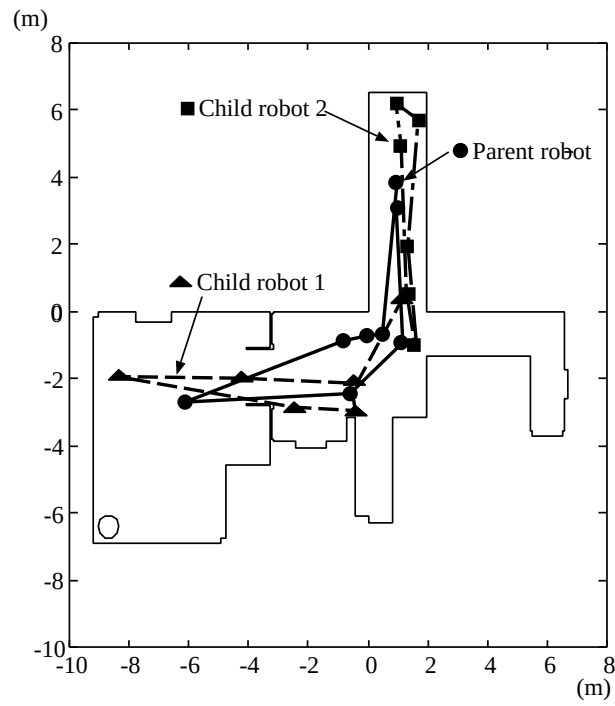


Figure 6.13: Moving paths of parent and child robots

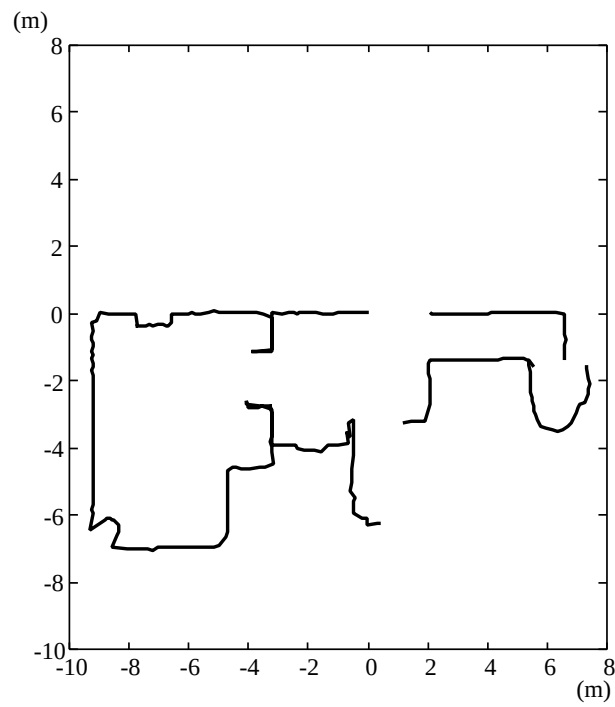


Figure 6.14: Acquired contour of rooms

6.2 CPS 誘導型床面自動清掃作業システムの構築

床面清掃ロボットシステムによる自律的な掃引清掃作業の実現には正確な位置同定技術が必要不可欠である。現在までに提案されたシステムは車輪回転角度の積分によるデッドレコニングや光ファイバジャイロ、超音波センサを用いた壁の計測などにより自己位置を推定している。そのため、例えば絨毯上や濡れた床面で生じる車輪の横ずれやスリップ量の補正、複数センサ情報の組み合わせによるセンサオフセット変動の補正など、正確な位置同定のためには多くの複雑で困難な処理が必要であった[15],[14],[16],[17]。

さらにロボットが走行中に障害物と衝突してその方位がずれる場合には、その出力に大きな誤差を生じることから、未知の障害物が数多く存在すると予想される環境での自律的な掃引清掃作業で用いるのは非現実的と考えられていた。またGPSの利用は、ビル内部や地下環境の床面の清掃作業を想定した場合には困難である。

そこで本章では、これら従来手法では実現困難であった地下や屋内などでの完全自律型床面自動清掃ロボットシステムに対し、CPSを導入することで床面の特性や周囲環境の情報が得られない場合でも正確な掃引作業が可能となる、「CPS 誘導型床面自動清掃作業システム」を提案する。次に試作した床面自動清掃ロボット ACRO-V (Automatic Cleaning RObot using the Vuton architecture) を紹介し、本ロボットの基本動作と自己位置同定法を示す。さらに清掃ロボット ACRO-V と第三次機械モデル CPS-III を用いて屋内環境において掃引作業実験を行った結果を示す。

6.2.1 CPS 誘導型床面自動清掃ロボットシステムの構成

CPS は床面の状態や環境が未知／既知に関わらず高精度な位置同定が可能であり、さらにロボットが移動中に障害物と接触しても同定精度に何ら影響がないため、床面自動清掃ロボットに用いた場合有効性が高いことが予測される。ただし、Fig. 4.1 のようなタイプの CPS では、移動中の各瞬間で何台かのロボットが常に静止している必要があり、群全体として移動速度は制限され、また静止ロボットが作業に直接参加できないため、作業能率が低下してしまうことが予測される[146]。そのため本システムでは、CPS により常に正確な位置同定を行う移動ロボット群 (CPS-III) と、CPS 動作には参加せず掃引作業を継続して行う清掃ロボット (ACRO-V) の 2 種類のロボットを組み合わせ、清掃ロボット ACRO-V は CPS ロボットの観測により大まかな位置同定を行い、CPS ロボットは正確な位置情報をもとに清掃ロボット ACRO-V を作業目標に沿って誘導することにより、CPS が効率的な掃引作業の妨げとなることなく、しかも群全体として正確な作業遂行を実現することとした。

試作した CPS 誘導型床面自動清掃ロボットシステムの構成を Fig. 6.15 に示す。本システムは第 5 章で示した 1 台の親ロボットと 2 台の子ロボットからなる第三次機械モデル CPS-III と、著者らがこれまでに提案したクローラ型全方向移動機構[18]を採用し、ノンホロノミック運動が可能な清掃ロボット ACRO-V の、4 台のロボットからなる。

6.2.2 清掃ロボット ACRO-V

清掃ロボット ACRO-V を Fig. 6.16 に示す。清掃ロボット ACRO-V には、通常床面の

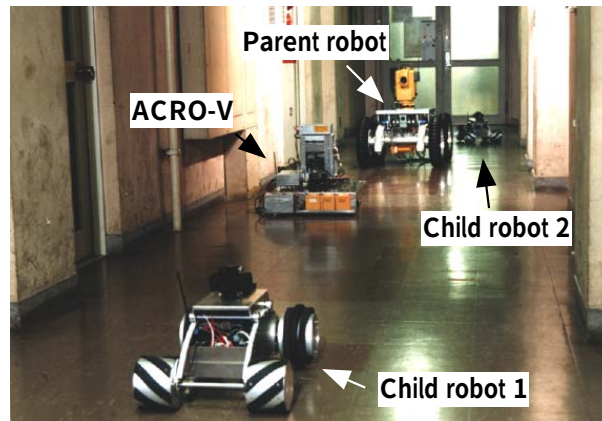


Figure 6.15: Total view of the automatic cleaning robot system with CPS-III and ACRO-V.

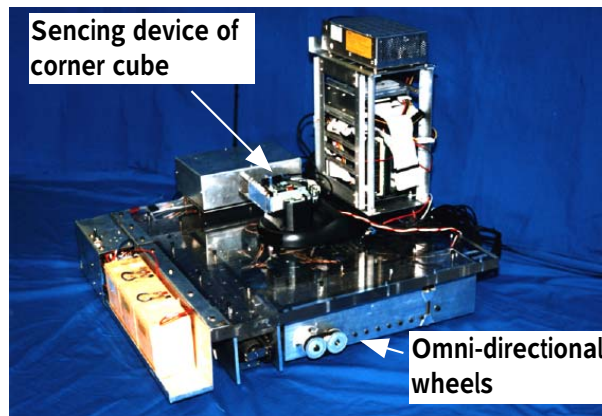


Figure 6.16: ACRO-V (Automatic Cleaning RObot using the Vuton architecture)

掃引作業には多くの方向転換が必要であることから、著者らがこれまでに開発したノンホロノミック運動が可能なクローラ型全方向移動機構を採用した[18]。これは、**Fig. 6.17**に示すように、軸方向に自由回転する円柱状車輪が複数連結したクローラを直交方向に4つ設置し、軸方向の推進力を干渉させることによりノンホロノミック運動を実現するものである。またクローラ取り付け部にはサスペンション機構を採用し、すべてのクローラが常に床面と接触するようにしている。本機構は、従来の全方向移動機構で一般に採用されている球形車輪や複数の車輪を組み合わせる直交車輪機構と異なり、クローラ面が床面と線接触するため大荷重に対しても良好な可搬特性を有する。

また上部にはレーザ式コーナキューブ追尾機構、画像処理及び情報処理用ボードコンピュータ (PCI586HV, Pentium 200MHz, 日本データシステム製)、運動制御用マイクロコンピュータ (8086-8MHz)、DC モータ (2444BL1 x 4, 光進ミニモ製)、モータ駆動回路 (BLD453, 光進ミニモ (株) 製)、バッテリー、無線システムを搭載している。

次に清掃ロボット ACRO-V の運動学関係式を示す。**Fig. 6.18**に示すように、慣性座標系 Σ_I における清掃ロボット ACRO-V の中心位置を $P(x, y)$ 、姿勢を ϕ と置く。また、ACRO-V

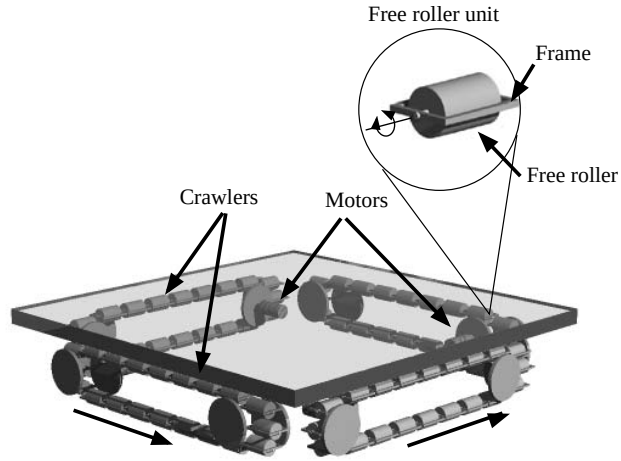


Figure 6.17: Omni-directional mobile robot, Vuton [18].

の4つのクローラ速度を $v_0 \sim v_3$ とし，車輪間隔を l_1, l_2 とする．

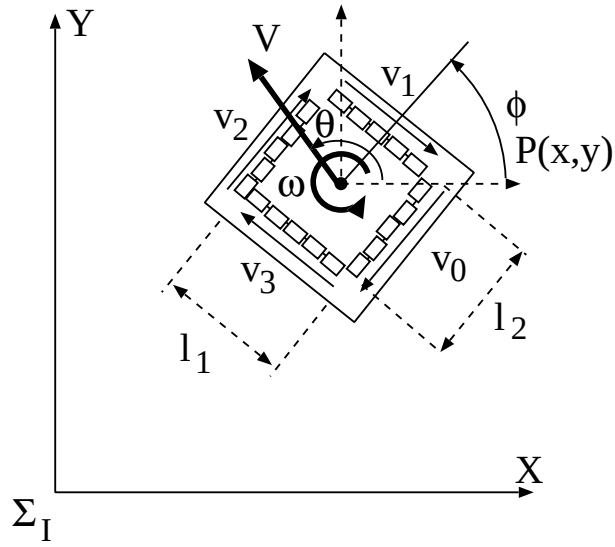


Figure 6.18: Coordinates of vuton for the analysis.

このとき， Σ_I 系での並進速度指令値 V とその方向 θ ，回転速度指令値 Ω が与えられた時，各車輪の速度指令値は以下のように与えればよい．

$$v_0 = V \cos(\theta - \phi) + \frac{l_1}{2} \Omega \quad (6.1)$$

$$v_1 = V \sin(\theta - \phi) + \frac{l_2}{2} \Omega \quad (6.2)$$

$$v_2 = -V \cos(\theta - \phi) + \frac{l_1}{2} \Omega \quad (6.3)$$

$$v_3 = -V \sin(\theta - \phi) + \frac{l_2}{2} \Omega \quad (6.4)$$

6.2.3 レーザ式コーナーキューブ追尾機構

清掃ロボット ACRO-V には, 新たに開発したレーザ光と CCD カメラによるコーナキューブ自動検出／追尾機構を搭載した. 本機構の構成を Figs. 6.19, 6.20 に示す. 赤色レーザ発信器 (10mW, キコー技研製) から照射されたレーザ光は, CPS-III の子ロボット上部のコーナキューブで反射され, ハーフミラー (PSMH-40C04-10-550, シグマ光機製), 全反射ミラー (TFA-30S05-1, シグマ光機製), 及びバンドパスフィルタ (BP-67, ケンコー製) により CCD カメラ (EDM-D40, SONY 製) に導かれる. この画像は画像入力ボード (FDMPCI, フォトロン製) から PCI バスを経由してボードコンピュータへ送られ, HSV 変換, 二値化処理により, 画面上でのコーナキューブの位置が求められる. また CCD カメラのピッチ, ヨー軸回りにステッピングモータを取りつけ, コーナキューブの画面位置に対するビジュアルフィードバック系を構成し, 自動追尾を行うようにしている. この機構により清掃ロボット ACRO-V は CPS ロボットを自動検出, 追尾し, CPS ロボットの方位角情報を得ることができる. 本システムの諸元を Table 6.2 に示す.

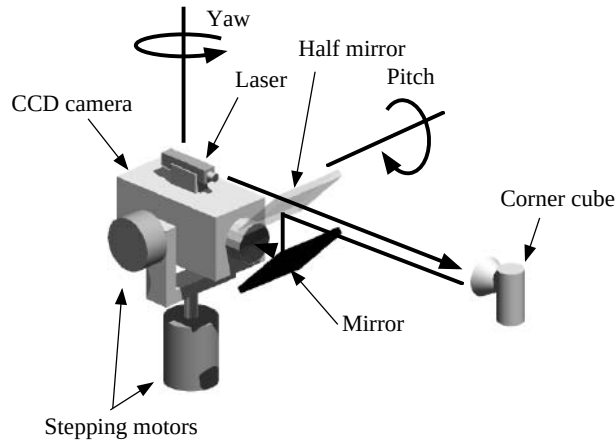


Figure 6.19: System for auto-detection and tracking of corner cubes.

Table 6.2: Specifications of the auto-detection and tracking system.

Range	pitch	± 25 [deg.]
	yaw	± 100 [deg.]
Maximum velocity	pitch	± 50 [deg./s]
	yaw	± 80 [deg./s]
Resolution	pitch	0.08 [deg.]
	yaw	0.11 [deg.]

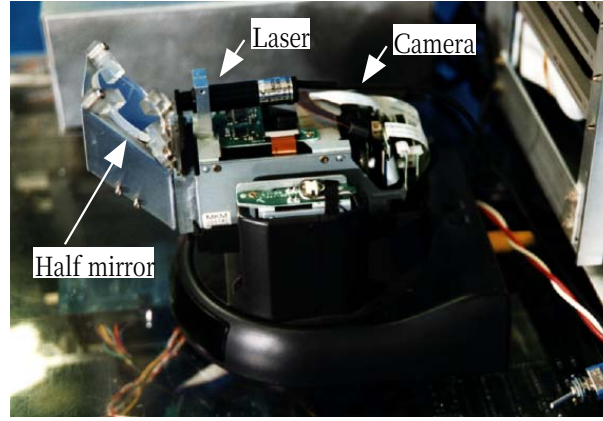


Figure 6.20: Total view of auto-detection and tracking system.

6.2.4 CPS ロボットによる清掃ロボットの誘導

CPS-III の動作原理は Fig. 4.1 と同様であり，CPS-III の個々のロボットの位置は親ロボットに搭載したレーザ距離計測装置より相対距離，角度を測定することで求めることができる．一方，清掃ロボット ACRO-V の位置は，クローラ回転角度を積分することにより推定される位置情報を，コーナキューブ追尾機構から得られる CPS ロボットの方位角情報により補正することで得るようにしている．具体的には以下のようになる．

まず式 (6.1)～(6.4) より清掃ロボットの慣性座標系での並進，回転速度を求めると，

$$V_x = -V \sin \theta = \frac{(v_0 - v_2) \cos \phi - (v_1 - v_3) \sin \phi}{2} \quad (6.5)$$

$$V_y = V \cos \theta = \frac{(v_0 - v_2) \sin \phi + (v_1 - v_3) \cos \phi}{2} \quad (6.6)$$

$$\Omega = \frac{v_0 + v_1 + v_2 + v_3}{2L} \quad (6.7)$$

が得られる．ただしここでは簡単のため $l_1 = l_2 = L$ とした．また実際には 4 つの式から 3 変数 V_x, V_y, Ω を求めるため，解が不定となるが，ここでは Ω の計算に全ての車輪速度を利用する上式を用いることにする．またこれらをサンプリング間隔 τ で離散化すると

$$x_{n+1} = x_n + \frac{v_0 - v_2}{2} \cos \phi \tau - \frac{v_1 - v_3}{2} \sin \phi \tau \quad (6.8)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{v_0 - v_2}{2} \sin \phi \tau + \frac{v_1 - v_3}{2} \cos \phi \tau \quad (6.9)$$

$$\phi_{n+1} = \phi_n + \frac{v_0 + v_1 + v_2 + v_3}{2L} \tau \quad (6.10)$$

なる観測方程式が得られる．また Fig. 6.21 に示すように，時刻 $n + 1$ でコーナキューブ追尾機構により，座標 $P_l(x_l, y_l)$ に置かれているコーナキューブが ψ 方向に観測されたとすると，新たに以下の観測方程式が成立する．

$$\phi_{n+1} + \psi = \tan^{-1} \frac{y_l - y_{n+1}}{x_l - x_{n+1}} \quad (6.11)$$

これら式 (6.8)～(6.11) で与えられた 4 つの観測方程式を基に、最尤推定法を用いて情報融合を行うことにより、式 (6.8)～(6.10) の 3 つの観測方程式のみを用いるデッドレコニング法よりはるかに高精度な位置同定ができることになる。

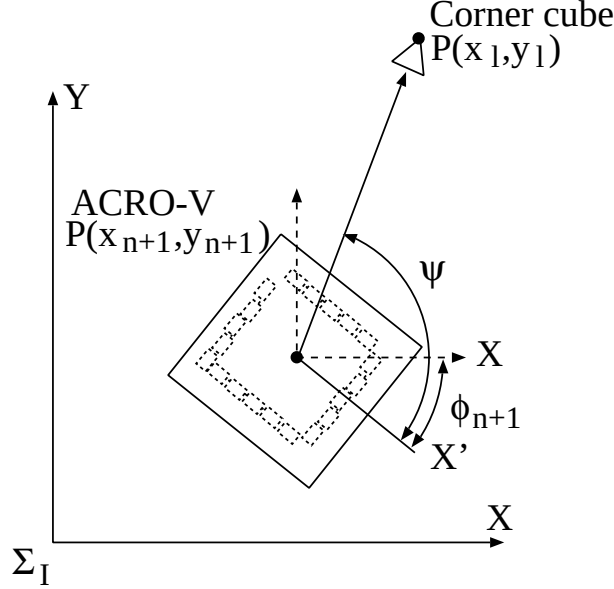


Figure 6.21: Direction toward a corner cube.

具体的には第 4.3 章と同様に $x_n = \tilde{x}_n + dx_n$ 等と置き、式 (6.8)～(6.11) に代入して整理すると、

$$AdX_{n+1} = L + K_p dX_n + K_l dX_l + K_a dV \quad (6.12)$$

が得られる。ただし

$$dX_n = (dx_n, dy_n, d\phi_n)^T \quad (6.13)$$

$$dX_l = (dx_l, dy_l, d\phi_l)^T \quad (6.14)$$

$$dV = (dv_0, dv_1, dv_2, dv_3, d\psi)^T \quad (6.15)$$

$$L = \begin{pmatrix} \tilde{x}_n + \frac{v_0 - v_2}{2} \cos \tilde{\phi}_n \tau - \frac{v_1 - v_3}{2} \sin \tilde{\phi}_n \tau - x_{n+1} \\ \tilde{y}_n + \frac{v_0 - v_2}{2} \sin \tilde{\phi}_n \tau + \frac{v_1 - v_3}{2} \cos \tilde{\phi}_n \tau - y_{n+1} \\ \tilde{\phi}_n + \frac{v_0 + v_1 + v_2 + v_3}{2L} - \phi_{n+1} \\ \tan^{-1} \frac{\tilde{y}_l - y_{n+1}}{\tilde{x}_l - x_{n+1}} - \tilde{\psi} - \phi_{n+1} \end{pmatrix} \quad (6.16)$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{\tilde{y}_l - y_{n+1}}{d^2} & \frac{\tilde{x}_l - x_{n+1}}{d^2} & 1 \end{pmatrix} \quad (6.17)$$

$$d = \sqrt{(\tilde{x}_l - x_{n+1})^2 + (\tilde{y}_l - y_{n+1})^2} \quad (6.18)$$

$$K_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{\tilde{v}_0 - \tilde{v}_2}{2} \sin \tilde{\phi}_n \tau - \frac{\tilde{v}_1 - \tilde{v}_3}{2} \cos \tilde{\phi}_n \tau \\ 0 & 1 & \frac{\tilde{v}_0 - \tilde{v}_2}{2} \cos \tilde{\phi}_n \tau - \frac{\tilde{v}_1 - \tilde{v}_3}{2} \sin \tilde{\phi}_n \tau \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.19)$$

$$K_l = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\tilde{y}_l - \tilde{y}_{n+1}}{d^2} & \frac{\tilde{x}_l - \tilde{x}_{n+1}}{d^2} & 0 \end{pmatrix} \quad (6.20)$$

$$K_a = \begin{pmatrix} \frac{\cos \tilde{\phi}_n}{2} \tau & -\frac{\sin \tilde{\phi}_n}{2} \tau & -\frac{\cos \tilde{\phi}_n}{2} \tau & \frac{\sin \tilde{\phi}_n}{2} \tau & 0 \\ \frac{\sin \tilde{\phi}_n}{2} \tau & \frac{\cos \tilde{\phi}_n}{2} \tau & -\frac{\sin \tilde{\phi}_n}{2} \tau & -\frac{\cos \tilde{\phi}_n}{2} \tau & 0 \\ \frac{\tau}{2L} & \frac{\tau}{2L} & \frac{\tau}{2L} & \frac{\tau}{2L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (6.21)$$

である。これより融合後の位置 $X_{n+1} = (x_{n+1}, y_{n+1}, \phi_{n+1})$ は次式で与えられることとなる。

$$X_{n+1} = (A^T \Sigma_{n+1}^{-1} A)^T A^T \Sigma_{n+1}^{-1} L \quad (6.22)$$

ただし

$$\Sigma_{n+1} = K_p \Sigma_n K_p^T + K_l \Sigma_l K_l^T + K_a \Sigma_v K_a^T \quad (6.23)$$

であり、 Σ_l はコーナキューブの設置誤差、すなわち式 (4.30) で計算される子ロボットの誤差分散行列であり、 Σ_v は車輪速度およびコーナキューブまでの方位角の測定誤差である。

6.2.5 床面掃引作業実験

構築した CPS 誘導型床面自動清掃ロボットシステムを用いて、屋内環境における実際の清掃作業を想定した掃引作業実験を行った。実験は滑りやすいプラスチック製のパネルで覆われた建物内の直線廊下で行い、清掃環境の形状と CPS 親ロボットと ACRO-V の初期位置は既知であるとした。また掃引作業実験では ACRO-V に対して清掃環境の形状に適した掃引作業の経路計画をあらかじめ行い、清掃ロボット ACRO-V を計画軌道に沿って約 100m 移動させたときの各ロボットの位置同定誤差を測定した。

まず CPS は用いずに清掃ロボット ACRO-V だけをデッドレコニングにより走行させる実験を行った。実験結果の一例を Fig. 6.22(a) に示す。このように走行とともに姿勢誤差が次第に蓄積し、20.3m 移動後に壁と衝突した。

次に CPS-III を同時に動かし、子ロボットの観測による位置補正を行いながら ACRO-V を掃引作業させる実験を行った。ただし CPS-III の移動形態としては様々なものが考えられるが、CPS-III は著者らが [148] で論じた CPS-II 型システムに属するものであり、移動とともに蓄積する位置同定誤差を最小化する移動形態は、Fig. 5.4 に示す最適化移動形態 ABC で与えられ、しかもこのうち各ロボット間の距離が小さい場合には、進行方向の前後にロボットを配置する最適化移動形態 C が最も有効であることから、本実験ではこの最適化移動形態 C を採用した。また清掃ロボット ACRO-V は、CPS-III の 2 台の子ロボットのうち、先頭に位置する子ロボット (子ロボット 1) を常に観測して式 (6.22), (6.23) により位

位置同定を行うこととし、物陰に隠れた場合など子ロボットが確認できない場合には、デッドレコニングだけを用いて位置同定を行うこととした。また実験では CPS-III の測距、測角誤差をそれぞれ 3mm, 5 秒とし、ACRO-V の速度測定誤差を 14mm/s ($=10\text{mm}/\text{画像サンプリング周期}0.7\text{秒}$)、方位角測定誤差を 5 度とした。

Fig. 6.22(b) に清掃ロボット ACRO-V の軌跡を、また Fig. 6.23 に CPS-III の移動の様子を示す。Fig. 6.22(b) 中の 2 箇所 の 楕円は、移動の途中で清掃ロボット ACRO-V から子ロボット 1 が見えなくなる領域を示しており、この区間では清掃ロボット ACRO-V はクローラ回転角度を積分するデッドレコニングだけで位置同定を行っている。そのため、この区間で目標軌道から若干のずれが生じているが、その後子ロボット 1 を再度観測し始めることにより、次第にずれが修正され、誤差が小さくなっていく様子がわかる。この実験での清掃ロボット ACRO-V の位置同定誤差は移動距離 101.7m に対して 140.8mm (移動距離の 0.14%)、CPS-III の親ロボットの位置同定誤差は 148.4mm であった。

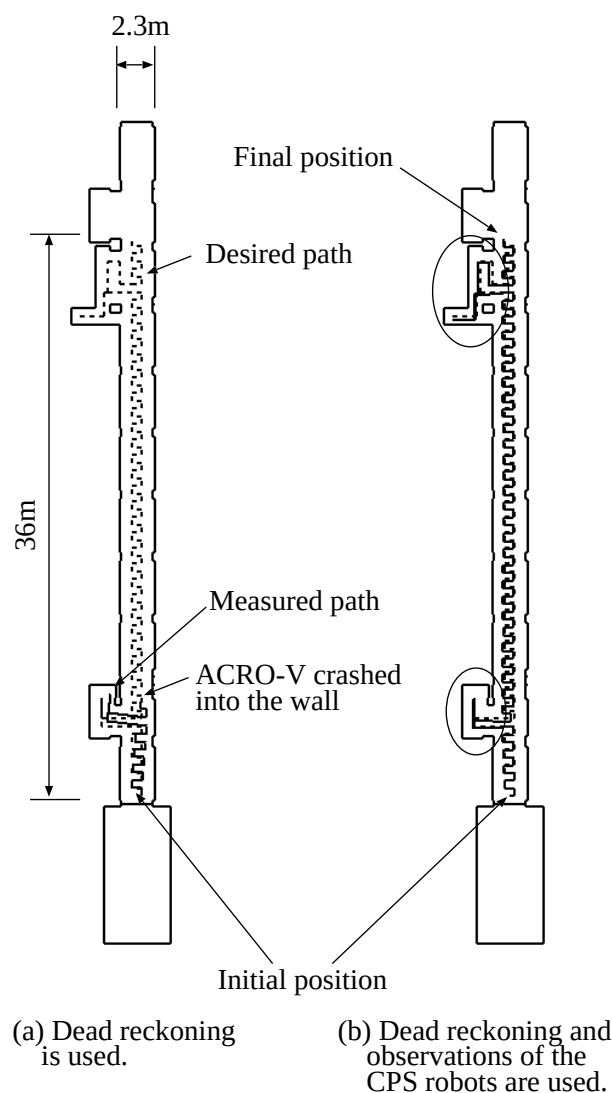


Figure 6.22: Path of ACRO-V with and without CPS.

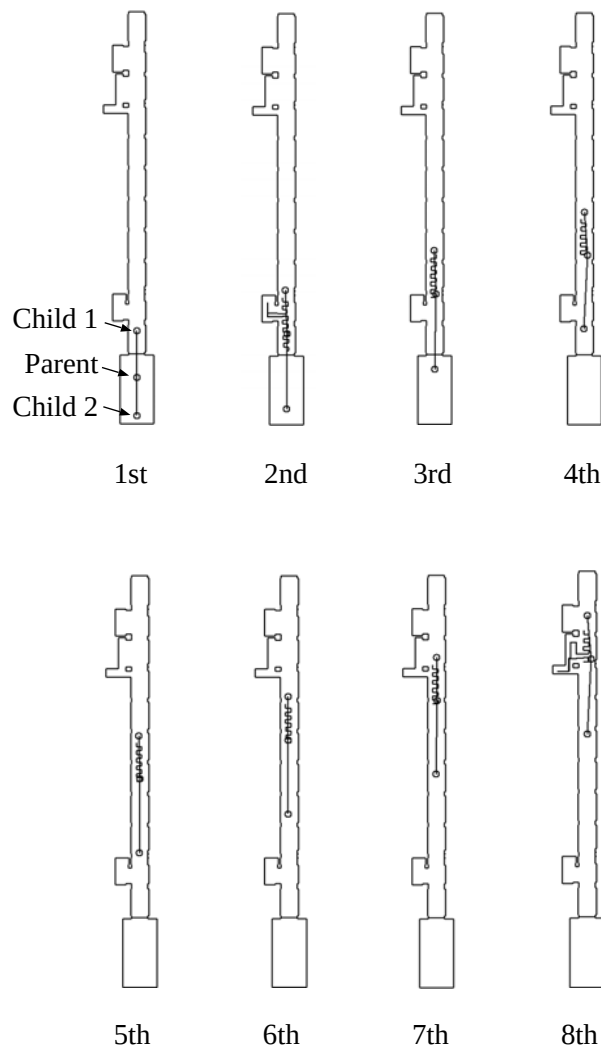


Figure 6.23: Path of the CPS robots.

6.2.6 まとめ

本章では筆者らがこれまでに提案した「協調ポジショニングシステム (CPS)」の実作業への応用例として、駅構内や地下街を想定した CPS 誘導型床面自動清掃ロボットシステムを試作し、掃引作業実験を行った結果を示した。本システムは清掃環境に予め磁気テープやランドマークを設置する必要がなく、また絨毯面や滑りやすい床面に対しても全く同様の作業性能が得られるなど、自動清掃ロボットとして有効性が高い。さらに本システムでは清掃作業を行う環境の地図はあらかじめ監督者等によって作成され、ロボットに与えられる必要があったが、前章で提案した「CPS アクティブタッチ融合型環境地図作成法」を用いれば、清掃作業開始前に作業環境の正確な地図を自動的に作成することが可能であり、清掃作業領域の計測から掃引作業まで自動的に行う清掃ロボットシステムを構築することができる。

さて、CPS は未知、不整地環境での高精度な位置同定の実現や三次元位置同定も容易に

実行可能であることなど、移動ロボットの位置同定手法として高い能力を有するが、CPSを具体的な用途に使用する際には、静止しているロボットが必ず必要なため、全体としての移動速度が上げられず、また静止ロボットは作業に参加することができないため、作業効率が低下するなどの欠点も考えられる。しかし筆者らは、本章で紹介したCPS誘導型自動清掃ロボットシステムのように、CPSにより正確な位置同定を行うロボット群とそのロボット群から情報を得て作業を継続して実行するロボット群を考え、作業に必要とされる位置同定精度や移動速度、作業効率に応じて、両者の比率を柔軟に変化させることでこの問題点を解決できるものと考えている。また実験の結果得られた位置同定精度は、数多くの方向転換を行ったにも関わらず移動距離の0.14%であり、ビル内部の清掃作業への応用を考えた場合、作業条件によっては単独での使用も可能であると思われる。

第7章 結論

本研究により以下の知見を得た．

1. 自律移動ロボットに対し，従来困難であった未知／不整地環境における高精度な位置同定を実現する「協調ポジショニング法，Cooperative Positioning System, CPS」を提案した．本手法は複数のロボットが協調的に行動して始めて発現する群・集団としての機能を，特に位置同定に利用することにより，未知／不整地／三次元屋外環境での高精度な位置同定を可能にするものである．
2. 「協調ポジショニング法，Cooperative Positioning System, CPS」の定義と基本構成，特徴，応用分野等について検討し，今後 CPS を実用化するために解決すべき課題を明らかにした．また CPS の工学的な実現可能性を検証するため，第一次 CPS 機械モデル CPS-I を試作し移動測定実験を行った．
3. 「協調ポジショニング法，Cooperative Positioning System, CPS」に対して，位置計測時の測定誤差が蓄積することにより生じる位置同定誤差の定量的な評価を，誤差分散行列，共分散行列を用いて行なう誤差伝播の基本方程式を導出した．
4. 「協調ポジショニング法，Cooperative Positioning System, CPS」に対して，多数台のロボットを用いた大規模システムへ適用した場合を考え，その際得られる1つの同定位置に対する複数冗長な位置情報を，重みつき最小二乗法により融合することにより，各位置情報に含まれる測定誤差の影響を押え，位置同定精度を向上する手法を提案した．また第二次 CPS 機械モデル CPS-II を用いた移動測定実験により提案した手法の有効性を検証した．
5. 「協調ポジショニング法，Cooperative Positioning System, CPS」に対して，レーザ距離計測装置とコーナキューブを利用し，より高精度な位置同定を実現した第三次機械モデル CPS-III を構築した．また CPS-III に対する累積誤差の基本的性質を解明し，累積誤差を最小化する最適化された動作シーケンスを誘導した．さらに CPS-III を用いた屋外環境における精度測定実験により，提案した最適化移動形態の妥当性を確認した．
6. 「協調ポジショニング法，Cooperative Positioning System, CPS」を具体的な用途に使用する例として「CPS アクティブタッチ融合型環境地図作成法」，および「CPS 誘導型床面自動清掃作業システム」の2つの応用例を紹介し，CPS を実用化する上で今後解決すべき課題を検討した．

付 録 A 各基本移動形態に対する誤差解析解の導出

A.1 基本移動形態 A,B の誤差解析解

第 5 章 3 項で示した基本移動形態 A,B に対する移動後の位置同定誤差の解析解を示す。親ロボットの位置を (x, y) , 子ロボットの位置をそれぞれ $(x + d, y + h)$, $(x - d, y + h)$ とすると, 各ロボットが移動距離 l ずつ交互に移動する場合, 親ロボットの移動 n 回目の誤差分散行列

$$\Sigma_n = \begin{pmatrix} \sigma_{x,n}^2 & \rho_{xy,n} & \rho_{x\theta,n} \\ \rho_{xy,n} & \sigma_{y,n}^2 & \rho_{y\theta,n} \\ \rho_{x\theta,n} & \rho_{y\theta,n} & \sigma_{\theta,n}^2 \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

の各項は, 式 (3.14) から解析的に以下のように求められる。ただし移動開始時の親ロボットの位置同定誤差は 0 と仮定した。まず, 移動一回目の誤差分散行列の各項は

$$\sigma_{x,1}^2 = \frac{2L_1^2 L_2^2 - d^2 l^2}{2d^2 L_2^2} \sigma_r^2 + \frac{l^2}{2} \sigma_\phi^2 \quad (\text{A.2})$$

$$\sigma_{y,1}^2 = \frac{l^2 d^2 (\sigma_r^2 - L_1^2 \sigma_\phi^2)(\sigma_r^2 - L_2^2 \sigma_\phi^2) + K \sigma_r^2 \sigma_\phi^2}{2d^2 \{L_1^2 (\sigma_r^2 - L_2^2 \sigma_\phi^2) + L_2^2 (\sigma_r^2 - L_1^2 \sigma_\phi^2)\} + K \sigma_\phi^2} \quad (\text{A.3})$$

$$\sigma_{\theta,1}^2 = \frac{h^2 L_2^2 + (h + l)^2 L_1^2}{2d^2 L_1^2 L_2^2} \sigma_r^2 + \sigma_\phi^2 \quad (\text{A.4})$$

$$\rho_{x\theta,1} = \frac{2h L_2^2 + l d^2}{2d^2 L_2^2} \sigma_r^2 - \frac{l}{2} \sigma_\phi^2 \quad (\text{A.5})$$

ただし,

$$L_1^2 = d^2 + h^2 \quad (\text{A.6})$$

$$L_2^2 = d^2 + (h + l)^2 \quad (\text{A.7})$$

$$K = 2(L_1^2 + L_2^2)L_1^2 L_2^2 \quad (\text{A.8})$$

となり, 式 (3.14) より移動 n 回目の誤差分散行列の各項は

$$\begin{aligned} \sigma_{x,n}^2 &= \sigma_{x,1}^2 + \sigma_{x,n-1}^2 + l^2 \sigma_{\theta,n-1}^2 - 2l \rho_{x\theta,n-1} \\ &= n \sigma_{x,1}^2 + \frac{n(2n-1)(n-1)l^2}{6} \sigma_{\theta,1}^2 - n(n-1)l \rho_{x\theta,1} \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

$$\sigma_{y,n}^2 = \sigma_{y,1}^2 + \sigma_{y,n-1}^2 = n\sigma_{y,1}^2 \quad (\text{A.10})$$

$$\sigma_{\theta,n}^2 = \sigma_{\theta,1}^2 + \sigma_{\theta,n-1}^2 = n\sigma_{\theta,1}^2 \quad (\text{A.11})$$

$$\begin{aligned} \rho_{x\theta,n} &= \rho_{x\theta,1} + \rho_{x\theta,n-1} - l\sigma_{\theta,n-1}^2 \\ &= \rho_{x\theta,1} - \frac{n(n-1)l}{2}\sigma_{\theta,1}^2 \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

$$\rho_{y\theta,n} = \rho_{xy,n} = 0 \quad (\text{A.13})$$

となる。

A.2 基本移動形態 C の誤差解析解

基本移動形態 C に対する移動後の位置同定誤差の解析解を示す。子ロボットを親ロボットの前後方向に距離 r_1, r_2 離れて配置し、各ロボットが y 軸方向に交互に距離 l ずつ移動する場合、親ロボットの移動 n 回目の誤差分散行列は、前項と同様に式 (3.14) から解析的に以下のように求められる。ただし移動開始時の親ロボットの位置同定誤差は 0 と仮定した。まず、移動一回目の誤差分散行列の各項は

$$\sigma_{x,1}^2 = \frac{l^2(r_1^2 + r_2^2) - 2lr_1r_2(r_1 - r_2) + 4r_1^2r_2^2}{(r_1 + r_2)^2}\sigma_{\phi}^2 \quad (\text{A.14})$$

$$\sigma_{y,1}^2 = \sigma_r^2 \quad (\text{A.15})$$

$$\sigma_{\theta,1}^2 = \frac{2\{l^2 + l(r_1 - r_2) + r_1^2 + r_2^2\}}{(r_1 + r_2)^2}\sigma_{\phi}^2 \quad (\text{A.16})$$

$$\rho_{x\theta,1} = \frac{l^2(r_1^2 - r_2^2) - 2r_1r_2(r_1 - r_2) - 4lr_1r_2}{(r_1 + r_2)^2}\sigma_{\phi}^2 \quad (\text{A.17})$$

となり、式 (3.14) より移動 n 回目の誤差分散行列の各項は

$$\begin{aligned} \sigma_{x,n}^2 &= \sigma_{x,1}^2 + \sigma_{x,n-1}^2 + l^2\sigma_{\theta,n-1}^2 - 2l\rho_{x\theta,n-1} \\ &= n\sigma_{x,1}^2 + \frac{n(2n-1)(n-1)l^2}{6}\sigma_{\theta,1}^2 - n(n-1)l\rho_{x\theta,1} \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

$$\sigma_{y,n}^2 = \sigma_{y,1}^2 + \sigma_{y,n-1}^2 = n\sigma_r^2 \quad (\text{A.19})$$

$$\sigma_{\theta,n}^2 = \sigma_{\theta,1}^2 + \sigma_{\theta,n-1}^2 = n\sigma_{\theta,1}^2 \quad (\text{A.20})$$

$$\begin{aligned} \rho_{x\theta,n} &= \rho_{x\theta,1} + \rho_{x\theta,n-1} - l\sigma_{\theta,n-1}^2 \\ &= n\rho_{x\theta,1} - \frac{n(n-1)l}{2}\sigma_{\theta,1}^2 \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

$$\rho_{y\theta,n} = \rho_{xy,n} = 0 \quad (\text{A.22})$$

となる。

付 録 B 偶然誤差と系統誤差

ロボットシステムの特性を評価する場合、アームについては微小運動の伝達特性、また移動ロボットについては位置計測誤差の伝搬などの微分特性が多く用いられる。従来、これらの特性の解析には、個々の微小変動の出現確率がある確率分布に従うという仮定のもとに解析が行なわれていた。しかし著者らはこのような考え方には根本的な誤りのあることに気付いた。そしてこの手法では現象の生起回数が増加すると、その結果は実際の変動とは異なったものとなることがわかった。本項ではこの問題点を明確化し、微分特性評価に対する新たな解析法を示す。

B.1 従来の誤差解析法の問題点

ここでは簡単のため、移動ロボットの位置同定の例を用いて説明する。このような計測では、測定誤差をガウス分布等の確率分布で与え、各測定毎の誤差分散を積算することで累積誤差を評価する手法がこれまで提案されている [19],[77]。ところがこの方法は測定回数が増えると、実際に発生する誤差と異なるという重大な問題を生じる。例えば、初期位置 0 から一定速度 v で直進するロボットを考え、 n サンプル後のロボットの推定位置を x_n とする。ただしロボットの位置は次式のようにデッドレコニング計測されているとする。

$$x_n = x_{n-1} + v\tau \quad (\text{B.1})$$

ここで速度の測定誤差が平均 0、分散 σ_v^2 の確率分布に従うとすると、(B.1) 式を全微分しその二乗平均値を計算すると、 n サンプル後の推定位置の誤差分散が、

$$\sigma_{x_n}^2 = \sigma_{x_{n-1}}^2 + \sigma_v^2 \tau^2 = \sigma_{x_0}^2 + n\sigma_v^2 \tau^2 \quad (\text{B.2})$$

と与えられる。ところがこのロボットは n サンプル時間内に距離 $nv\tau$ だけ移動するから、移動距離に対する誤差分散の平方根 (標準偏差) の割合は、初期分散 $\sigma_{x_0}^2$ を 0 とすると

$$\frac{\sqrt{\sigma_{x_n}^2}}{nv\tau} = \frac{1}{\sqrt{n}} \frac{\sqrt{\sigma_v^2}}{v} \quad (\text{B.3})$$

となる。これは無限大の距離を進むと相対的に標準偏差がゼロになることを示している。しかし実際の移動誤差は移動距離の一乗あるいはそれ以上の率で増加することは明らかである。(B.3) 式はその事実に合わない。

B.2 誤差の性質

測定に関わる誤差には、Fig.B.1に示すように、目盛の読み違いなど測定のたびに平均0のある確率分布に従ってばらつく「偶然誤差」と、測定装置の目盛のずれや測定値の計算に用いた定数に含まれる誤差など、その測定固有の値を有する「系統誤差」が同時に存在すると考えられる [139]。しかし従来の議論では偶然誤差しか考慮していない。前項で指摘した問題が生じたのはこれが原因と思われる。

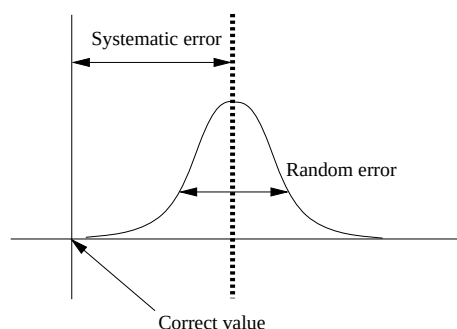


Figure B.1: Random and systematic errors

一般に少ない回数の測定で測定量が得られる場合などは、測定開始前により正確な別の手段を用いて測定システムを校正することにより、系統誤差の影響を無視することができる。ところがデッドレコニング法のように同じ測定を数多く繰り返す場合、系統誤差こそが本質的な誤差を形成し、その大きさは測定回数に比例して増加する。それに対して偶然誤差は測定回数の平方根に比例する。つまり Fig.B.2に示すように測定回数が増えると、従来無視されていた系統誤差の割合が相対的に大きくなり、その影響が支配的になるため、従来からの誤差論とは別の全く新しい考え方の導入が必要と考えられる。

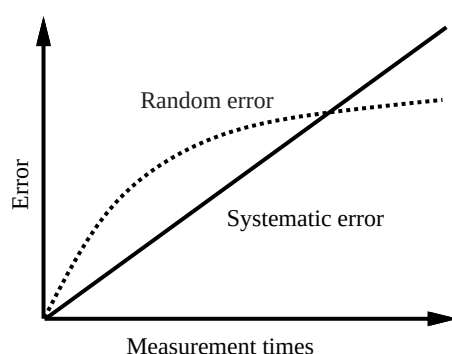


Figure B.2: Comparison between random and systematic errors

B.3 線形計画法を用いた誤差解析法の提案

系統誤差を定量的に評価する新しい解析法として、系統誤差の領域を最大値，最小値で与え，線形計画法を利用して測定量の誤差を計算する手法を提案する．これは鄭ら [127] の手法をさらに発展させたものである．例としてここではロボットの位置同定を考え， n 回目の測定でのロボットの直進速度，回転速度をまとめて v_n とし，その時のロボットの推定位置 x_n の微分特性を次式で与える．

$$dx_n = Adx_{n-1} + Bdv_{n-1} \quad (B.4)$$

具体的に n 回目の測定時の位置同定誤差は以下のように計算される．まず，ロボットの自由度を m ，測定変数の数を l ，速度測定誤差の領域を $l_v \leq dv_n \leq u_v$ とする．

1. dx_{n-1}, dv_{n-1} をパラメータと考え，(B.4) 式中の m 個の方程式から $m-1$ 個のパラメータを消去し， $_{l+m}C_{m-1}$ 個の方程式を作る．

$$f_i(dx_n) = g_i(dx_{n-1}, dv_{n-1}) \quad i = 1 \sim _{l+m} C_{m-1} \quad (B.5)$$

2. 次に dx_{n-1}, dv_{n-1} の様々な組合せに対して， $n-1$ 回目の測定で得られた dx_{n-1} の頂点座標や速度測定誤差の領域を考慮して，(B.5) 式右辺の $g_i(dx_{n-1}, dv_{n-1})$ に対する最大値 $g_{i,max}(dx_{n-1}, dv_{n-1})$ ，最小値 $g_{i,min}(dx_{n-1}, dv_{n-1})$ を計算する．

3. $n-1$ 回目の測定で使用した拘束条件リスト

$$l_j \leq h_j(dx_{n-1}) \leq u_j \quad j = 1 \sim s \quad (B.6)$$

と (B.4) 式を用い，次式を計算する．

$$\tilde{h}_j(dx_n) = h_j(A^{-1}dx_n) \quad (B.7)$$

$$\tilde{l}_j = l_j + \min(h_j(A^{-1}Bdv_{n-1})) \quad (B.8)$$

$$\tilde{u}_j = u_j + \max(h_j(A^{-1}Bdv_{n-1})) \quad (B.9)$$

4. 新たな拘束条件リストを作成する．

$$l_k \leq h_k(dx_n) \leq u_k \quad k = 1 \sim s \quad (B.10)$$

ただし

$$l_k^T = (g_{i,min}(dx_{n-1}^T, dv_{n-1}^T), \tilde{l}_j^T)^T \quad (B.11)$$

$$u_k^T = (g_{i,max}(dx_{n-1}^T, dv_{n-1}^T), \tilde{u}_j^T)^T \quad (B.12)$$

$$h_k(dx_n)^T = (f_i(dx_n)^T, h'_j(dx_n)^T)^T \quad (B.13)$$

$$s \leftarrow s + _{l+m} C_{m-1} \quad (B.14)$$

である．これにより位置同定誤差 dx_n の存在領域は m 次元空間で (B.10) 式で規定される凸多面体の内部となる．

5. 拘束条件リストが無限に増加するのを防ぐため, step 4 で領域の境界を決定するのに用いられなかった拘束条件や, 領域の境界を規定する平面の面積を評価基準として優先度の低い拘束条件を決定し, 拘束条件リストから削除する.
6. step 1 へ戻る.

これらのアルゴリズムは線形計画法を用いることにより高速に計算することができる.
Fig.B.3 に y 軸方向へ直線移動する移動ロボットの誤差計算例を示す.

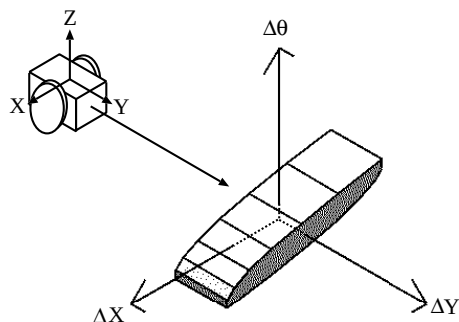


Figure B.3: Example of positioning errors

謝辞

本論文の研究と執筆を行うにあたり、全面的に御指導いただいた、東京工業大学 工学部 機械宇宙学科 広瀬茂男教授に慎んで感謝の意を表します。そして、常に本研究をあたたく見守ってくださり、御指導、御鞭撻をいただき、また、本論文について懇切な御指導、御討論をいただいた、狼嘉彰教授、米田完助教授に深く感謝いたします。さらに本研究について、数々の有益なアドバイスをいただいた機械宇宙学科 福島文彦助手に慎んでお礼申し上げます。

また本研究を共同遂行していただいたメンバーである、富士通研究所の指田直毅氏、ソニーの岩崎倫三氏、論文作成に協力して下さった高松隆一郎氏に深く感謝いたします。そして、本研究を始めるきっかけを与えて下さり、さらにその後も研究の方向付けなど多くの助言をいただいた、富士通研究所の長田茂美氏に慎んで感謝の意を表します。

最後に様々な御協力、御討論をしていただいた、広瀬・米田研の皆様方に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 金子, 小谷, 森, 屋外自律移動ロボットのセンサ統合による移動戦略, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集,,No.2,pp.735-738,1996
- [2] 青野, 松田, 藤井, 初本, 神谷, センサフュージョンを用いた自律移動機の位置制御, 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,,pp.785-788,1997
- [3] 判澤, 篠田, 曲谷, 梁島, 増本, 視覚障害者ナビゲーションシステムに用いる側位手法, 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,,pp.771-772,1997
- [4] J. M. Tranquilla and H. M. Al-Rizzo, Investigation of GPS precise relative static positioning during periods of ice clouds and snowfall, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing??, Vol.31, No.1, pp.295-299, 1993
- [5] T. E. Duerr, Effect of terrain masking on GPS position dilution of precision, Navigation, Vol.39, No.3, pp.317-323, 1992
- [6] K. Kobayashi F. Munekata and K. Watanabe, Accurate Navigation via Differential GPS and Vehicle Local Sensors, Proc. of IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration Systems,,pp.9-16, 1994
- [7] 黒田, 熊谷, 西, 西村, GPSを有する自律移動型湖面環境計測システム, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集,,pp.608-609, 1997
- [8] 小林, 渡辺, 村山, 差動GPSを用いた複合車両航法について, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.7, pp.880-887,
- [9] 久保田, 中谷, 市江, 谷田, 特徴点を用いたマップマッチング手法の実験的検討, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集,,pp.285-286,
- [10] 前山, 大矢, 油田, 時間遅れのある外界センサ情報とデッドレコニング情報の融合による移動ロボットのポジショニング, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集,,pp.277-278, 1994
- [11] S. Hirose N. Ootsukasa T. Shirai H. Kuwahara and K. Yoneda, Fundamental Considerations for the Design of a Planetary Rover, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,pp.1939-1944, 1995
- [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

- [13] M. Rude,"A Flexible, Shock-absorbing Bumper System with Touch-sensing Capability for Autonomous Vehicle",Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems '96,,,pp.410-417,1996
- [14] 江口, 藪内, 高木, 乾, 小林, 移動ロボットの直進走行制御と移動方式, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集,,No.3,pp.897-898,1995
- [15] 高木, 藪内, 江口, 乾, 小林, 移動ロボットの絨毯上走行の補正制御システム-その2-, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集,,No.2,pp.599-600,1996
- [16] 藪内, 江口, 高木, 乾, 小林, 移動ロボットの走行に及ぼす床面の影響と検出, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集,,No.3,pp.899-900,1995
- [17] 青山, 自律走行式床面清掃ロボット, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集,,No.3,pp.889-900,1995
- [18] S. Hirose and S. Amano,The Vuton: High Payload High Efficiency Holonomic Omni-Directional Vehicle,Proc. of 6th Int. Symp. of Robotics Research,,,pp.253-260,
- [19] 渡部, 油田, 車輪型移動ロボットのデッドレコニングシステムにおける位置データ誤差, 第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集,,,pp.347-350,1988
- [20] H.F. Durrant-Whyte,Uncertain Geometry in Robotics,IEEE J. of Robotics and Automation,Vol.4,No.1,pp.23-31,1988
- [21] Elfes A.,Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation,Computer,Vol.22,No.6,pp.46-57,1989
- [22] K. Sugihara,Some Location Problems for robot navigation Using a Single Camera,"Computer Vision, Graphics, and Image Processing",42,1,pp.112-129,1988
- [23] K. C. Drake E. S. McVey and R. M. Inigo,Experimental Position and Ranging Results for a Mobile Robot,IEEE J. of Robotics and Automation,Vol.RA-3,No.1,pp.31-42,1987
- [24] Elfes A.,Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation,IEEE J. of Robotics and Automation,Vol.RA-3,No.3,pp.249-265,1987
- [25] M. R. Kabuka and A. E. Arenas,Position Verification of a Mobile Robot Using a Standard Pattern,IEEE J. of Robotics and Automation,vol.RA-3,,pp.505-516,1987
- [26] L. Matthies and S. A. Shafer>Error Modeling in Stereo Navigation,IEEE J. of Robotics and Automation,Vol.RA-3,No.3,pp.239-248,1987
- [27] E. Gat R. Desai R. Ivlev J. Loch and D. P. Miller,Behavior Control for Robotic Exploration of Planetary Surfaces,IEEE Trans. on Robotics and Automation,Vol.10,No.4,pp.490-503,1994

- [28] H. Schneiderman and M. Nashman, A Discriminating Feature Tracker for Vision-based Autonomous Driving, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.10, No.6, pp.769-775, 1994
- [29] K. T. Sutherland and W. B. Thompson, Localizing in Unstructured Environments: Dealing with the Errors, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.10, No.6, pp.740-754, 1994
- [30] B. Barshan and H. F. Durrant-Whyte, Inertial Navigation Systems for Mobile Robots, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.11, No.3, pp.328-342, 1995
- [31] R. Talluri and J. K. Aggarwal, Mobile Robot Self-Location Using Model-Image Feature Correspondence, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.12, No.1, pp.63-77, 1996
- [32] N. Ayache and O. D. Faugeras, Maintaining Representations of the Environment of a Mobile Robot, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.5, No. 6, pp.804-819, 1989
- [33] D. J. Kriegman E. Triandl and T.O.Binford, Stereo Vision and Navigation in Buildings for Mobile Robot, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.5, No.6, pp.792-803, 1989
- [34] M. Beckerman and E. M. Oblow, Treatment of Systematic Errors in the Processing of Wide-angle Sonar Sensor Data for Robotic Navigation, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.6, No.2, pp.137-145, 1990
- [35] I. J. Cox, Blanche - An Experiment in Guidance and Navigation of an Autonomous Robot Vehicle, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.7, No.2, pp.193-204, 1991
- [36] J. J. Leonard and H. F. Durrant-Whyte, Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.7, No.3, pp.237-???, 1991
- [37] M. J. Mataric, Integration of Representation into Goal-Driven Behavior-Based Robot, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.8, No.3, pp.304-312, 1992
- [38] R. Talluri and J. K. Aggarwal, Position Estimation for an Autonomous Mobile Robot in an Outdoor Environment, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.8, No.5, pp.573-584, 1992
- [39] S. Atiya and G. D. Hager, real-time Vision-Based Robot Localization, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.9, No.6, pp.785-800, 1993
- [40] J. J. Leonard H. F. Durrant-Whyte and I. J. Cox, Dynamic map building for an autonomous mobile robot, Int. J. of Robotic Research, Vol.11, No.4, pp.286-???, 1992

- [41] C. Becker J. Salas K. Tokusei and J-C Latombe,Reliable Navigation Using Landmarks,Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.401-406,1995
- [42] D. L. Boley E. S. Steinmetz K. T. Sutherland,Robot Localization from Landmark using Recursive Total Least Squares,Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.1381-1386,1996
- [43] Ph. Bonnifait and G. Garcia,A Multisensor Localization Algorithm for Mobile Robots and its Real-Time Experimental Validation,Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.1395-1400,1996
- [44] J. Borenstein and L. Feng,Gyrodometry: A New Method for Combining Data from Gyros and Odometry in Mobile Robots,Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.423-428,1996
- [45] R. Chatila and J. laumond,Position Referencing and Consistent World Modeling for Mobile Robots,Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.138-145,1985
- [46] F. Chenavier and J. L. Crowley,Position estimation for a mobile robot using vision and odometry,Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.2588-2599,1992
- [47] J. F. Corre and G. Garcia,Real-time determination of the location and speed of mobile robots running on non-planar surface,Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.2594-2599,1992
- [48] F. Cozman and E. Krotkov,Robot Localization using a Computer Vision Sextant,Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.106-111,1995
- [49] J. L. Crowley,Dynamic World Modeling for an Intelligent Mobile Robot Using a Rotating Ultra-Sonic Ranging Device,Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.128-135,1985
- [50] J. L. Crowley,World Modeling and Position Estimation for a Mobile Robot Using Ultrasonic Ranging,Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.674-680,1989
- [51] C. Fennema and A. R. Hanson,Experiments in Autonomous Navigation,Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.24-31,1993
- [52] Y. Fuke and E. Krotkov,Dead Reckoning for a Lunar Rover on Uneven Terrain,Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.411-416,1996
- [53] C. D. McGillem and Theodore Rappaport,Infra-red Location System for Navigation of Autonomous Vehicle,Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.1236-1238,1988

- [54] U. D. Hanebeck G. Schmidt, Set Theoretic Localization of Fast Mobile Robots Using an Angle Measurement Technique ,Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.1387-1394,1996
- [55] E. Krotkov, Mobile Robot Localization Using A Single Image, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.978-983,1989
- [56] M. J. Mataric, Environment Learning Using a Distributed Representation, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.402-406,1990
- [57] F. Nashashibi and M. Devy, 3D Incremental Modeling and Robot Localization in a Structured Environment using a Laser Range Finder, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.20-27,1993
- [58] H. Nasr and B. Bhanu, Landmark Recognition for Autonomous Mobile Robots, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.1218-1223,1988
- [59] T. Nishizawa A. Ohya and S. Yuta, An Implementation of On-board Position Estimation for a Mobile Robot, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.395-400,1995
- [60] E. Prassler and E. E. Milios, Position Estimation Using Equidistance Line, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.85-92,1995
- [61] N. Roy G. Dudek P. Freedman, Surface Sensing and Classification for Efficient Mobile Robot Navigation, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.1224-1228,1996
- [62] C. M. Wang, Location Estimation and Uncertainty Analysis for Autonomous Mobile Robot, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.1230-1235,1988
- [63] T. Tsubouchi and S. Yuta, Map Assisted Vision System of Mobile Robots for Reckoning in a Building Environment, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,,,pp.1978-1984,1987
- [64] P. van. Turenout G. Honderd, Following a Wall with a Mobile Robot Using Ultrasonic Sensors, Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems '92,,,pp.1451-1456,1992
- [65] T. Nakamura S. Takamura M. Asada, Behavior-Based Map Representation for a Sonar-based Mobile Robot by Statistical Methods, Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems '96,,,pp.276-283,1996
- [66] E. Piat D. Meizel, Degrees of confidence fusion in a probabilistic context Application to range data fusion, Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems '96,,,pp.268-275,1996

- [67] B. C. Bloom, Use of landmarks for mobile robot navigation, Proc. of SPIE Intell. Robots Comput. Vision, Vol. 579, pp.351-355, 1985
- [68] M. Case, Single landmark navigation by mobile robots, Proc. of SPIE Mobile Robots, Vol. 727, pp.231-238, 1985
- [69] 陳謙 辻三郎, 更新効率を重視した屋内移動ロボットの経路計画のための新しい地図モデル, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.1, pp.89, 1992
- [70] 橋本, 大場, 藤川, 今牧, 西田, レーザ位置計測とデッドレコニングの統合による車輪型移動ロボットの位置推定法, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.7, pp.1028-1038, 1993
- [71] 小森谷, 大山, 谷, 移動ロボットのためのランドマーク観測計画, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.4, pp.533-540, 1993
- [72] 小野口一則 渡辺睦 岡本恭一 久野義徳, 移動視覚のための多重情報地図, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.3, pp.401, 1993
- [73] 西澤慶満 八木康史 谷内田正彦, 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
- [74] 八木康史 津戸明広 谷内田正彦, 移動視により得られたワイヤフレームモデルからの空間構成の理解, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.3, pp.477, 1993
- [75] 山内幸治 石川聖二 加藤清史, 2台の移動ロボットを用いた同一対象物の位置検出について, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.1, pp.112, 1994
- [76] 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
- [77] 登内, 坪内, 有本, 移動ロボットにおける空間有限性を考慮した位置推定—内界センサ情報と作業領域に関する知識のベイズ的融合法—, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.6, pp.695-699, 1994
- [78] 加藤浩仁 石黒浩 辻三郎, 統計的解析による複雑な環境における環境モデルの獲得, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.5, pp.660, 1996
- [79] 佐藤和也 八木康史 谷内田正彦, 全方位視覚センサCOPISを用いた環境マップ生成—実環境適用のための処理改善—, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.6, pp.887-895, 1996
- [80] 木室義彦 長田正, 球面六角形画像ピラミッドを用いた球面投影による全方位画像処理, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.6, pp.809, 1996
- [81] 出原進一 八木康史 谷内田正彦, 複数移動ロボットにより観測された環境地図の統合, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.3, pp.127-135, 1997
- [82] 広瀬茂男 前川和信 梅谷陽二, 地図作成型視覚システムの情報処理, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.3, pp.191, 1984

- [83] 小森谷, 舘, 谷江, 移動ロボットの自律移動の一方法, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.3, pp.222-231, 1984
- [84] 津村, 藤原, 白川, 橋本, メモリに記憶されたコース指示による移動体の自動誘導, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.3, pp.209-214, 1984
- [85] 津村, 藤原, 橋本, 唐, 追尾式レーザ燈台を用いた二次元移動体の位置測定法, 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.6, pp.521-530, 1985
- [86] 広瀬茂男 吉田和弘 田口幹, 地図生成視覚システムMAR Sの研究(背景光と揺動外乱のキャンセリング), 日本ロボット学会誌, Vol.4, No.3, pp.241, 1986
- [87] 松本勉 油田信一, 経路地図に従った移動ロボットの自律走行システム, 日本ロボット学会誌, Vol.5, No.5, pp.351, 1987
- [88] 広瀬茂男 吉田和弘 虎谷泰昌, 地図生成視覚システムMAR Sの研究(実時間地図構成法の検討), 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.1, pp.14, 1988
- [89] 津村, 橋本, 藤原, レーザとコーナキューブを利用した3次元移動体の能動位置計測法, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.1, pp.347-350, 1988
- [90] 坪内孝司 油田信一, 移動ロボット用視覚のための建物内環境地図の表現法と視野像の生成, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.3, pp.199, 1989
- [91] 浅田稔, センサ情報の統合と理解による移動ロボットのための世界モデルの構築, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.2, pp.160, 1990
- [92] 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, Vol.8, No.6, pp.641, 1990
- [93] 石黒浩 山本雅史 辻三郎, 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
- [94] 長谷部雅彦 大西昇 杉江昇, 自律移動ロボットのための定性的な環境地図の獲得と利用, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.3, pp.335, 1991
- [95] 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
- [96] , 特集: 自律分散システム, 計測と制御, Vol.29, No.10 , pp.877-952, 1990
- [97] , 特集: 群知能ロボット, 計測と制御, Vol.31, No.11 , pp.1115-1194, 1992
- [98] , 特集: 自律分散システムの新たなる展開, 計測と制御, Vol.32, No.10 , pp.789-862, 1993
- [99] , 特集: 群知能ロボット, 計測自動制御学会誌, Vol.31-11,, , 1992

- [100] 福田, 植山, マルチエージェントロボットの研究の動向, 第11回日本ロボット学会
学術講演会予稿集,, pp.7-10, 1993
- [101] , 特集: マルチエージェントロボットシステム, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.4, pp.427-
473, 1992
- [102] 坂根, マルチロボットの行動, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.8, pp.1185-1191, 1993
- [103] , 特集: ネットワーク型ロボットシステム, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.6, pp.779-
825, 1994
- [104] 長谷川 坂根 佐藤, 知能行動のための情報処理, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.1, pp.112-
121, 1991
- [105] 石田, 浅間, 尾崎, 松元, 遠藤, 自律分散ロボットシステムのための通信機能の設計
と通信シミュレータの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.4, pp.544-551, 1992
- [106] 浅間, 尾崎, 松元, 石田, 遠藤, 通信を用いた自律分散管理に基づく複数自律移動ロ
ボットの協調的作業分担決定手法, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.7, pp.955-963, 1992
- [107] 油田, 複数の自律移動ロボットの協調行動, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.4, pp.433-
438, 1992
- [108] 加藤, 複数の移動ロボットの協調, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.6, pp.785-790, 1994
- [109] 安井, 原, 有竹, 2 移動体の協調走行の運動学的解析, 日本ロボット学会
誌, Vol.12, No.7, pp.1013-1020, 1994
- [110] 山内, 石川, 加藤, 2 台の移動ロボットを用いた同一対象物の位置検出について, 日
本ロボット学会誌, Vol.12, No.1, pp.112-115, 1994
- [111] 新井他, 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, Vol.12, No.3, pp.472-478, 1994
- [112] 新井, 吉田, 太田, 複数移動ロボット系の局所的な通信に関する研究, 日本ロボット
学会誌, Vol.12, No.6, pp.886-892, 1994
- [113] 橋本, 大場, 江口, 複数の移動ロボットによる動的搬送制御法, 日本ロボット学会
誌, Vol.13, No.6, pp.886-893, 1995
- [114] 市川, 原, 群ロボットシステムにおける群知能の発現特性に関する研究, 日本ロボッ
ト学会誌, Vol.13, No.8, pp.1138-1144, 1995
- [115] 太田, 新井, 倉林, 作業の性質を考慮したロボット群の動作計画, 日本ロボット学会
誌, Vol.13, No.4, pp.517-524, 1995
- [116] 吉田, 三木, 新井, 太田, 複数移動ロボット系における局所的通信に対する群行動の
効果, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.5, pp.727-733, 1995

- [117] 原, 安井, 有竹, 2 移動体の協調走行の運動学的解析 (第 2 報: 一次元一般波状路面における協調条件), 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.1, pp.96-104, 1996
- [118] 太田, 武衛, 新井, 大隅, 陶山, 2 台の移動ロボットの協調による搬送作業, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.2, pp.263-270, 1996
- [119] 吉田, 山本, 新井, 太田, 倉林, 多数移動ロボットシステムの最適な局所的通信範囲の設計, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.3, pp.394-401, 1997
- [120] 新井, 太田, 複数移動ロボット系の計画, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.4, pp.444-449, 1992
- [121] 鄭, 有本, 局所センサ情報を用いた未知環境における複数の移動ロボットの運動計画法, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.2, pp.216-225, 1992
- [122] 劉, 有本, 局所センサ情報を用いた未知環境における複数の移動ロボットの運動計画法, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.2, pp.216-225, 1992
- [123] 佐藤, 極小点のないポテンシャル場を用いたロボットの動作計画, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.5, pp.702-709, 1993
- [124] 山本, 黒田, 毛利, 複数台ロボットによる協調的作業経路計画, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.2, pp.217-226, 1993
- [125] 新井, 太田, 仮想的なインピーダンスを用いた複数移動ロボット系の動作計画, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.7, pp.1039-1046, 1993
- [126] 大川, 横山, 移動ロボットの箱押し作業の制御, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.1, pp.148-155, 1993
- [127] 鄭, 友近, 吉川, 複数のロボット機構による協調的操り時の動的可操作性, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.892-900, 1993
- [128] 永田, 土屋, 移動ロボットの障害物回避に関する知的制御, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.8, pp.1203-1211, 1993
- [129] 加藤, 西山, 武野, 交通ルールの適用による複数の移動ロボットの協調行動, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.2, pp.291-298, 1994
- [130] 太田, 新井, 倉林, 作業の性質を考慮したロボット群の動作計画, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.4, pp.517-524, 1995
- [131] 佐々木, 太田, 新井, 吉田, 倉林, 複数移動ロボットによる未知対象物の協調把持, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.7, pp.1010-1017, 1996
- [132] 単, 長谷川, 複数移動ロボット間の行動観測に基づく空間推論と動作計画-狭い通路でのすれ違い動作の計画-, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.7, pp.1003-1009, 1996

- [133] 尾崎, 浅間, 石田, 松元, 遠藤, 通信を用いた複数自律移動ロボットの相互衝突回避, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.7, pp.961-967, 1996
- [134] 広瀬, 天野, 大荷重高効率全方向車両の開発, 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,,,pp.350-355, 1993
- [135] 原田, 遠藤, 野口, 原田, 測量学通論, 技術書院,,,1988
- [136] 斉藤, 高嶋, 程基準点測量, 山海堂,,,1985
- [137] 浅香, 測量, 税務経理協会,,,1970
- [138] 春日屋, 佐藤, 教職課程測量, 日新出版,,,1987
- [139] 吉沢, 新しい誤差論 実験データ解析法, 共立出版,,,1989
- [140] V. フバータル, 線形計画法, 啓学出版,,,1988
- [141] M. Betke and L. Gurvits, Mobile Robot Localization Using Landmarks, IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.13, No.2, pp.251-263, 1997
- [142] 有本, カルマンフィルタ, 産業図書,,,1977
- [143] 吉田, 倉爪, 梅谷, 宇宙ロボットの多腕協調制御 (スタビライジングアームの利用による制御トルクの最適化), 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6, pp.718-726, (1991).
- [144] R. Kurazume, S. Nagata, S. Hirose, Cooperative Positioning with Multiple Robots, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1250-1257, (1994).
- [145] R. Kurazume, S. Nagata, S. Hirose, Cooperative Positioning with Multiple Robots, Proc. JSME 2nd Int. Conf. on Motion and Vibration Control, pp. 244-249, (1994).
- [146] 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).
- [147] R. Kurazume, S. Hirose, S. Nagata, and N. Sashida, Study on Cooperative Positioning System -Basic Principle and Measurement Experiment-, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1421-1426, 1996.
- [148] 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)
- [149] 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).
- [150] R. Kurazume and S. Hirose, Study on Cooperative Positioning System - Optimum Moving Strategies for CPS-III -, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 2896-2903, 1998.

- [151] 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-III を用いた自動清掃ロボットシステムの開発–”, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.7, pp.934-941, (1998).
- [152] 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 アクティブタッチ融合型地図生成法–”, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.2 に掲載決定
- [153] 広瀬, 長田, 倉爪, 群ロボットによる協調ポジショニング法, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1135-1138, (1992).
- [154] 広瀬, 倉爪, 長田, 群ロボットによる協調ポジショニング法, 第3回ロボットシンポジウム予稿集, pp. 37-42, (1993).
- [155] 広瀬, 長田, 倉爪, 群ロボットによる協調ポジショニングシステム–第2報: 複数位置情報の融合–, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.301-302, (1994).
- [156] 指田, 長田, 広瀬, 倉爪, 群ロボットによる協調ポジショニングシステム–第3報: 第2次移動ロボットシステムの構築と測定実験, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.849-850, (1995).
- [157] 倉爪, 広瀬, ロボットシステムの微分特性評価に関する基本的考察第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.35-36, (1995).
- [158] 倉爪, 広瀬, 指田, 長田, 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-, 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, Vol.B, pp.943-946, (1996).
- [159] 倉爪, 広瀬, 長田, 指田, 協調ポジショニングシステムの研究-第4報: 第2次機械モデル CPS-II の最適移動形態- 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.607-608, (1996).
- [160] 倉爪, 広瀬, 指田, 長田, 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), 日本機械学会第74期通常総会講演会講演論文集, Vol.IV,
- [161] 倉爪, 岩崎, 広瀬, 群ロボットによる協調ポジショニングシステム–第5報: 第三次機械モデル CPS-III の構築, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.207-208, (1997).
- [162] 倉爪, 岩崎, 広瀬, 群ロボットによる協調ポジショニングシステム–第6報: CPS-III を用いた自動清掃ロボットシステムの開発, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.209-210, (1997).
- [163] 倉爪, 広瀬, 岩崎, 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–日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, , 2CI1-4, (1998).
- [164] 倉爪, 広瀬, 協調ポジショニングシステムの研究-第8報: CPS-III による長距離移動測定実験- 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.169-170, (1998).

業績一覧

印刷論文

- [1] R. Kurazume, S. Nagata, S. Hirose, Cooperative Positioning with Multiple Robots, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1250-1257, (1994).
- [2] R. Kurazume, S. Nagata, S. Hirose, Cooperative Positioning with Multiple Robots, Proc. JSME 2nd Int. Conf. on Motion and Vibration Control, pp. 244-249, (1994).
- [3] 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).
- [4] R. Kurazume, S. Hirose, S. Nagata, and N. Sashida, Study on Cooperative Positioning System -Basic Principle and Measurement Experiment-, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1421-1426, 1996.
- [5] 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)
- [6] 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).
- [7] R. Kurazume and S. Hirose, Study on Cooperative Positioning System - Optimum Moving Strategies for CPS-III -, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 2896-2903, 1998.
- [8] 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-III を用いた自動清掃ロボットシステムの開発—”, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.7, pp.934-941, (1998).
- [9] 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 アクティブタッチ融合型地図生成法—”, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.2 に掲載決定

口頭発表

- [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, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1135-1138, (1992).
- [2] 広瀬, 倉爪, 長田, 群ロボットによる協調ポジショニング法, 第3回ロボットシンポジウム予稿集, pp. 37-42, (1993).
- [3] 広瀬, 長田, 倉爪, 群ロボットによる協調ポジショニングシステム—第2報: 複数位置情報の融合—, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.301-302, (1994).

- [4] 指田, 長田, 広瀬, 倉爪, 群ロボットによる協調ポジショニングシステムー第3報: 第2次移動ロボットシステムの構築と測定実験, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.849-850, (1995).
- [5] 倉爪, 広瀬, ロボットシステムの微分特性評価に関する基本的考察, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.35-36, (1995).
- [6] 倉爪, 広瀬, 指田, 長田, 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-, 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, Vol.B, pp.943-946, (1996).
- [7] 倉爪, 広瀬, 長田, 指田, 協調ポジショニングシステムの研究-第4報: 第2次機械モデル CPS-II の最適移動形態-, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.607-608, (1996).
- [8] 倉爪, 広瀬, 指田, 長田, 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), 日本機械学会第74期通常総会講演会講演論文集, Vol.IV,
- [9] 倉爪, 岩崎, 広瀬, 群ロボットによる協調ポジショニングシステムー第5報: 第三次機械モデル CPS-III の構築, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.207-208, (1997).
- [10] 倉爪, 岩崎, 広瀬, 群ロボットによる協調ポジショニングシステムー第6報: CPS-III を用いた自動清掃ロボットシステムの開発, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.209-210, (1997).
- [11] 倉爪, 広瀬, 岩崎, 協調ポジショニングシステムの研究ー第7報: CPS アクティブタッチ融合型地図生成法ー日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, , 2CI1-4, (1998).
- [12] 倉爪, 広瀬, 協調ポジショニングシステムの研究-第8報: CPS-III による長距離移動測定実験- 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.169-170, (1998).