



(19) Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 10 2004 015 111 A1 2005.10.20

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2004 015 111.3

(22) Anmeldetag: 27.03.2004

(43) Offenlegungstag: 20.10.2005

(51) Int Cl.<sup>7</sup>: G01S 17/89  
G01S 17/50

(71) Anmelder:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE

(74) Vertreter:

Patentanwälte von Kreisler, Selting, Werner et col.,  
50667 Köln

(72) Erfinder:

Lingemann, Kai, 53119 Bonn, DE; Surmann,  
Hartmut, Dr., 53757 Sankt Augustin, DE; Nüchter,  
Andreas, 53225 Bonn, DE; Hertzberg, Joachim,  
Dr., 53129 Bonn, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

WO 00/34 803 A2

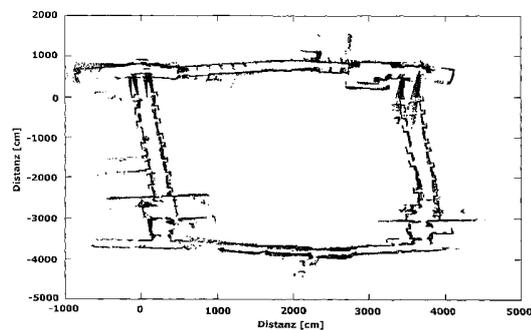
PAYEUR, P. et al.: "Registration of Range Measure-  
ments With Compact Surface Representation". In:  
IEEE Transactions on Instrumentation and  
Measure-  
ment, Vol. 52, No. 5, Oktober 2003, S. 1627-1634;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Ermittlung der Position und Orientierung eines navigierenden Systems**

(57) Zusammenfassung: Bei dem Verfahren zur Ermittlung der Position und Orientierung eines autonom navigierenden Systems, beispielsweise eines Roboters, in einer Umgebung werden die Entfernung des in Fahrtrichtung vor dem navigierenden System liegenden Bereichs der Umgebung bei Bewegung des navigierenden Systems abgetastet und die abgetasteten Entfernungspunkte mindestens zweier aufeinander folgender Abtastvorgänge als Entfernungsmesskurven in der Polardarstellung abgespeichert. Anschließend werden die Entfernungsmesskurven der beiden aufeinander folgenden Abtastvorgänge auf charakteristische Merkmale wie z. B. Extremwerte untersucht. Danach werden die Parameter von voneinander getrennt durchführbaren Translations- und Rotationstransformationen der einen Entfernungsmesskurve zur Ermittlung der Zuordnung der charakteristischen Merkmale der transformierten Entfernungsmesskurve zu solchen der anderen Entfernungsmesskurve und die Position und die Orientierung des navigierenden Systems anhand von dessen Position und dessen Orientierung zum Zeitpunkt der zeitlich ersten von zwei aufeinander folgenden Abtastungen sowie der ermittelten Parameter der Translations- und Rotationstransformationen bestimmt.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung der Position und Orientierung eines autonom oder ferngesteuert navigierenden Systems, beispielsweise eines Roboters, in einer Umgebung.

## Technisches Anwendungsgebiet

**[0002]** Für moderne mobile Roboterplattformen stellt die präzise und stabile Selbstlokalisierung eine der wichtigsten Voraussetzungen dar, um erfolgreich in ihrer Umgebung autonom agieren zu können. Ohne zuverlässiges Wissen über die sogenannte "Pose" (Position und Orientierung) des Roboters sind Applikationen wie Kartierung und komplexere Handlungsplanungen nicht denkbar. Dargestellt wird ein neuentwickelter Algorithmus, der es ermöglicht, in Echtzeit die Pose einer autonomen, mobilen Highspeed-Roboterplattform ( $\geq 4$  m/s) zu berechnen.

Stand der Technik, Nachteile des Standes der Technik

**[0003]** Es existieren eine Reihe von Lokalisierungsalgorithmen, die sich anhand des eingesetzten Sensors sowie des Vorgehens bei der Berechnung der Transformation des Roboters zwischen der Datenaufnahme einteilen lassen.

**[0004]** Lokalisierungsverfahren, die auf spezifischen Eigenarten von Ultraschall-Sensoren oder Stereokameras aufbauen, sind von vornherein auszuschließen, da diese inhärent eine bei weitem zu langsame Verarbeitungsgeschwindigkeit für den o.g. Einsatz aufweisen, bzw. die Genauigkeit systembedingt nicht hinreichend exakt ist. Aus diesem Grunde wurde für das im Folgenden vorgestellte Verfahren ein Lichtlaufzeit-Laserscanner gewählt, wie er in vielen Roboterplattformen bereits zur Standardausrüstung gehört.

**[0005]** Verfahren, die zwei Laserscans als Eingabe verarbeiten, um aus der Transformation des zweiten Scans relativ zu dem ersten eine Änderung der Pose des Roboters während der Aufnahme zu berechnen, lassen sich weiter anhand des zugrundeliegenden Algorithmus klassifizieren. Stand der Technik sind Verfahren über Belegtheitsgitter, Histogramme, Matching von Scanpunkten gegen Linien, punktweises Matching beider Scans sowie Matching von aus den Scans extrahierten Merkmalen.

**[0006]** Allen bekannten Verfahren ist gemein, dass die Geschwindigkeit des jeweiligen Algorithmus nicht ausreicht, um eine sichere, stabile Lokalisierung eines schnell (z. B. mit 4 m/s) fahrenden Roboters zu gewährleisten. Ferner ist die Anwendung typischerweise entweder auf Indoor- oder auf Outdoor-Szenarien beschränkt.

**Aufgabenstellung**

Mit der Erfindung gelöste Aufgabe

**[0007]** Eine Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur Ermittlung der Position und Orientierung eines Systems zu schaffen, das in der Lage ist, auch im Falle eines Highspeed-Roboters (Geschwindigkeit  $\geq 4$  m/s) eine lokale Stabilisierung in Echtzeit zu gewährleisten.

**[0008]** Zur Lösung dieser Aufgabe wird ein Verfahren mit folgenden Schritten vorgeschlagen:

- Entfernungsabtastung des in Fahrtrichtung vor dem autonom navigierenden System liegenden Bereichs der Umgebung bei Bewegung des autonom navigierenden Systems,
- Abspeichern der abgetasteten Entfernungspunkte mindestens zweier aufeinander folgender Abtastvorgänge als Entfernungsmesskurven in der Polardarstellung,
- Untersuchung der Entfernungsmesskurven der beiden aufeinander folgenden Abtastvorgänge auf Extremwerte,
- Bestimmung von Parametern von voneinander getrennt durchführbaren Linear- und Rotations Transformationen der einen Entfernungskurve zur Ermittlung der Zuordnung der Extremwerte der transformierten Entfernungsmesskurve zu denen der anderen Entfernungsmesskurve und
- Bestimmung der Position und der Orientierung des autonom navigierenden Systems anhand von dessen Position und dessen Orientierung zum Zeitpunkt der zeitlich ersten von zwei aufeinander folgenden Abtastungen sowie der ermittelten Parameter der Linear- und Rotationstransformationen.

**[0009]** Mit der Erfindung wird die Strategie der relativen Lokalisierung verfolgt, die im Gegensatz zur absoluten weder Restriktionen auf bekannte und bereits kartographierte Umgebungen mit sich bringt, noch auf strukturvereinfachende Eingriffe in die Umgebung wie das Aufstellen von künstlichen Landmarken angewiesen ist.

**[0010]** Mit der Erfindung ist man in der Lage, in Echtzeit eine stabile Lokalisierung selbst eines Highspeed-Roboters zu gewährleisten. Die erreichte Frequenz beträgt auf einem Low-Level-Computer (Pentium III-800) in der Praxis durchschnittlich 2300 Hz, was die notwendige Verarbeitung eines jeden, mit 75 Hz eingehenden Scans garantiert, sowie die Durchführung von weiteren, anwendungsspezifischen Aufgaben durchzuführen gestattet.

## Grundzüge des Lösungsweges

**[0011]** Die Grundidee des Verfahrens besteht darin, dass zwei während der Fahrt des Roboters vorzugs-

weise aufeinander folgend durchgeführte Abtastvorgänge (Scans) miteinander verglichen und optimal zur Überdeckung gebracht werden. Die zu diesem Matching berechnete Transformation (Translation und Rotation) entspricht der Bewegung des Roboters zwischen beiden Scans. Verglichen werden dabei nicht die Scanpunkte direkt, sondern jeweils eine Menge von Merkmalen (natürlichen Landmarken), d. h. charakteristische Eigenschaften der Messkurve (z. B. Extremwerte, stark ansteigende Flanken, Wendepunkte), die automatisch aus dem Scan extrahiert werden und eine stark größenreduzierte (üblich: 97%) Repräsentation der gesamten Scandaten darstellt.

**[0012]** Der Lösungsweg gliedert sich gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung in folgende Schritte:

1. Berechnung der Merkmalsmengen:

Durch Anwendung von schnellen, linearen Filtern (z. B. Schärfung, Gradient, Weichzeichnung) werden Extrema in den in Polardarstellung (Auftragung der Entfernung über dem Winkel zur augenblicklichen Bewegungsrichtung des Systems vorzugsweise über  $180^\circ$ , also über dem jeweiligen vor dem System liegenden Halbraum) gegebenen Scans detektiert. Diese entsprechen Ecken und Sprüngen in den kartesischen Scans.

2. Die Punkte beider Merkmalsmengen werden paarweise zugeordnet. Zwei Punkte sind genau dann kongruent, wenn die bezeichneten Merkmale den selben Punkten in der realen, gescannten Umgebung entsprechen.

3. Die Berechnung der optimalen Transformation entspricht nun der Lösung eines Minimierungsproblems, gegeben durch eine Fehlerfunktion, die in Abhängigkeit einer Rotation  $R$  und einer Translation  $t$  den Fehler zwischen beiden Scans definiert als die Summe der quadratischen Abstände zwischen den Punkten des ersten und den um  $R$  und  $t$  transformierten Punkten des zweiten Scans.

**[0013]** Erzeugte Verbesserungen und Vorteile gegenüber dem Stand der Technik Das herausragende Merkmal der Erfindung ist die Eliminierung jeglicher Iterationen bei der Berechnung der optimalen Transformation zwischen zwei aufgenommenen Scans. Bisherige Scanmatching-Verfahren berechnen üblicherweise eine Schätzung der Transformation, wenden diese auf den zweiten Scan an, und bekommen damit eine neue Instanz des Optimierungsproblems. Fortlaufende Iteration verbessert die Schätzung, bis an einem bestimmten Punkt die Lösung als "optimal" angenommen und die Iteration beendet wird. Ein Großteil der aktuell eingesetzten Algorithmen benötigt ferner eine zweite Iterierungsstufe zur Berechnung einer jeglichen Transformationsschätzung. Die Lösung dieses Minimierungsproblems erfolgt in früheren bekannten Ansätzen durch iterative Methoden wie Gradientenabstieg oder simuliertes Abkühlen (si-

mulated annealing). In dem erfindungsgemäßen Verfahren wird dagegen mit Vorteil eine mathematische Trennung von Rotation und Translation benutzt, die eine Trennung und sukzessive Berechnung beider Größen erlaubt. Der beschriebene Lösungsweg dagegen berechnet die Transformation gänzlich in geschlossener Form. Eine weitere Verbesserung liegt in der Extraktion der zum Scanmatching benutzten Merkmale auf der aus den Distanzwerten des Scansignals (in graphischer Polardarstellung) gebildeten Folge. Ausnutzung von Polardarstellung und inhärenter Ordnung der eingehenden Daten ermöglichen die Benutzung von sehr schnellen, linearen Filtern zur sicheren Merkmalsextraktion, wodurch eine bisher unerreicht kurze Rechenzeit erzielt wird.

**[0014]** In zahlreichen Praxis-Tests hat sich das erfindungsgemäße Verfahren in Präzision und Geschwindigkeit gegenüber allen zur Evaluierung herangezogenen Referenzverfahren, wie sie in I. J. Cox. Blanche – An Experiment in Guidance and Navigation of an Autonomous Robot Vehicle. Journal of the IEEE Transactions on Robotics and Automation (TRA '91), 7(2):193-204, July 1991; F. Lu and E. Miliotis. Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans. In IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Conference (CVPR '94), pages 935-938, 1994; und G. Weiß, C. Wetzler, and E. von Puttkamer. Keeping Track of Position and Orientation of Moving Indoor Systems by Correlation of Range-Finder Scans. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '94), pages 595-601, Munich, Germany, 1994, beschrieben sind, als deutlich überlegen herausgestellt. Die Referenzverfahren sind ihrerseits Standard-Scanmatching-Verfahren, die in aktuell benutzten Robotersystem vielfältig zum Einsatz kommen.

**[0015]** Die Bedeutung der Präzision liegt auf der Hand, die Geschwindigkeit ist ein kritischer Faktor bei Einsatz in der Hochgeschwindigkeitsrobotik: Beim Einsatz zur Lokalisierung bedeutet ein langsamer Algorithmus in der Praxis nicht nur "längere Wartezeiten", sondern im laufenden Betrieb einen periodischen Verlust von eingehenden Scans, wenn diese nicht in Echtzeit verarbeitet werden können und verworfen werden müssen. Dies wiederum führt dazu, dass zwischen zwei tatsächlich verarbeiteten Scans größere Poseänderungen stattfinden können; ist die Geschwindigkeit des Roboters hinreichend hoch, so kann dies zu einem völligen Verlust der Pose führen. Ferner ergeben sich weitere Vorteile aus der hohen Effizienz des Verfahrens, die höhere Zykluszeiten und/oder geringere Prozessorauslastung bedeutet, was – unabhängig von der Geschwindigkeit des Roboters – dazu führt, dass schnellere Updates der Pose bzw. rechenzeitintensivere anwendungsspezifische Aufgaben (neben der reinen Lokalisierung des Roboters) durchführbar sind.

Ausführungsbeispiel

Ausführungsbeispiel

[0016] Als Beispiel sei eine 160 m lange Fahrt in einer Büroumgebung dokumentiert. Das Ergebnis ist in Abb. 1 gezeigt, in der alle während der Fahrt aufgenommenen Scans, transformiert anhand der berechneten Pose, eingezeichnet worden sind. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Karte rein inkrementell erstellt worden ist, ohne nachträglich korrigierende Hilfsmittel wie globale Relaxation oder explizite Erkennung und Korrektur von Zyklen, um die Güte des Algorithmus zu verdeutlichen. Ferner ist die berechnete Trajektorie direktes Ergebnis des oben beschriebenen Verfahrens, ohne Fusion mit Odometriewerten o.ä.

[0017] Abb. 2 stellt die berechnete Trajektorie dar, betitelt mit HAYAI (Highspeed And Yet Accurate Indoor/outdoor-tracking), das Ergebnis der Odometrie des Roboters sowie die Ergebnisse der o.g. Referenzverfahren, ebenfalls ohne Kalman-Filterung mit Odometriedaten. Abb. 2 belegt deutlich die Abweichung der jeweils berechneten Trajektorien, Abb. 1 belegt die Güte der Trajektorie des vorgestellten Verfahrens.

[0018] In der nachstehenden Tabelle wird ferner der signifikante Geschwindigkeitsvorteil gegenüber Standardverfahren deutlich, aufgezeigt sind die benötigten Zeiten zur Berechnung der Fahrt aus Abb. 2.

Verfahren	Zeit
HAYAI	5.41 s
Cox [1]	30.68 s
IDC [2]	47.09 s
Hist [3]	213.26 s

**Patentansprüche**

1. Verfahren zur Ermittlung der Position und Orientierung eines autonom navigierenden Systems, beispielsweise eines Roboters, in einer Umgebung, mit den folgenden Schritten:

- Entfernungsabtastung des in Fahrtrichtung vor dem navigierenden System liegenden Bereichs der Umgebung bei Bewegung des navigierenden Systems,
- Abspeichern der abgetasteten Entfernungspunkte mindestens zweier aufeinander folgender Abtastvorgänge als Entfernungsmesskurven in der Polardarstellung,
- Untersuchung der Entfernungsmesskurven der beiden aufeinander folgenden Abtastvorgänge auf charakteristische Merkmale wie z. B. Extremwerte,
- Bestimmung von Parametern von voneinander getrennt durchführbaren Translations- und Rotations-transformationen der einen Entfernungsmesskurve zur Ermittlung der Zuordnung der charakteristischen Merkmale der transformierten Entfernungsmesskur-

ve zu solchen der anderen Entfernungsmesskurve und  
 – Bestimmung der Position und der Orientierung des navigierenden Systems anhand von dessen Position und dessen Orientierung zum Zeitpunkt der zeitlich ersten von zwei aufeinander folgenden Abtastungen sowie der ermittelten Parameter der Translations- und Rotationstransformationen.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

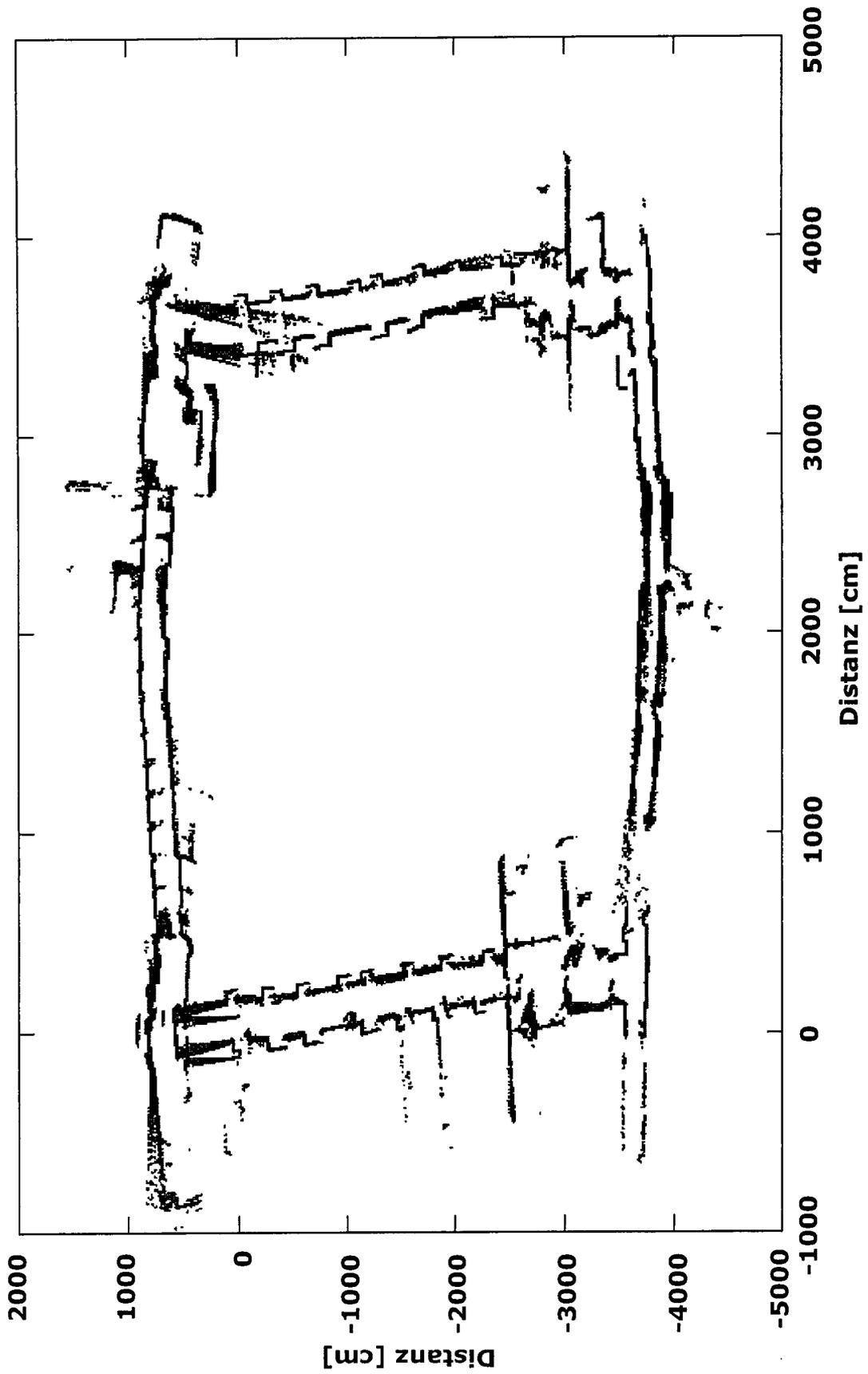
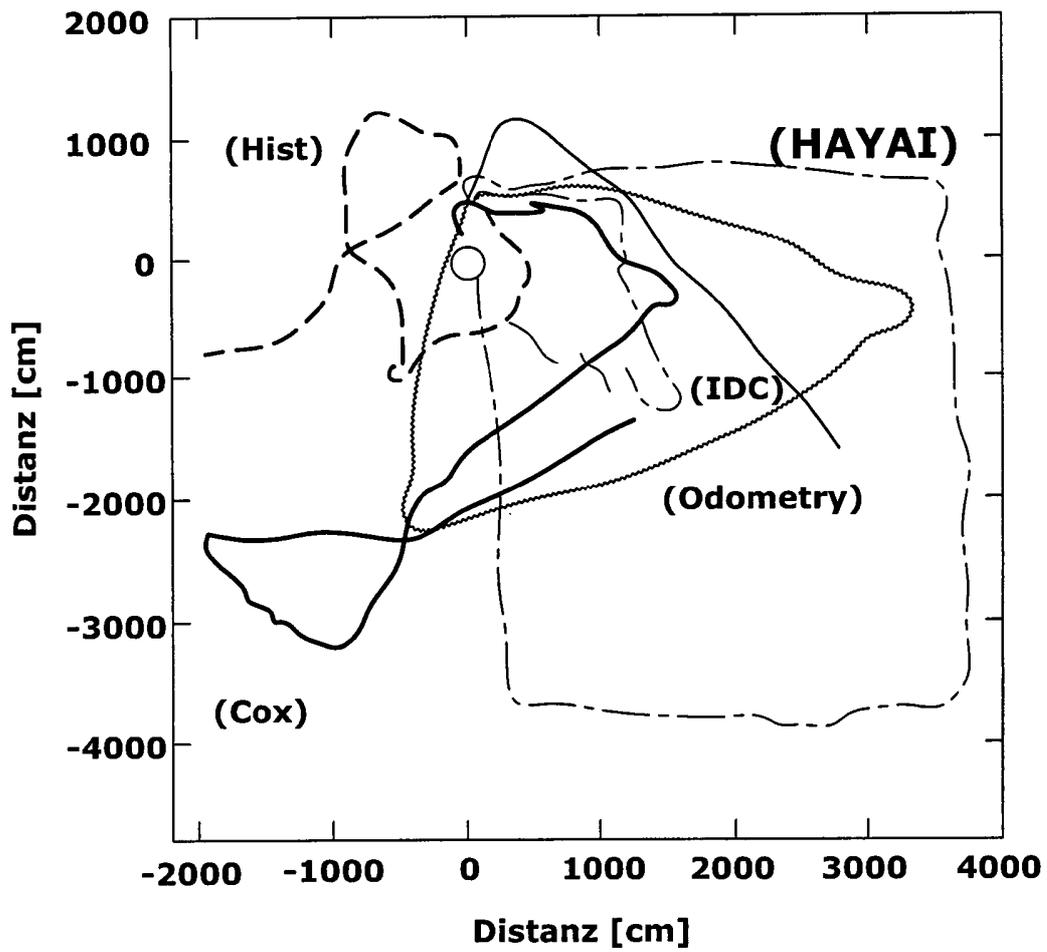


Fig.1



**Fig.2**