

(12)

## Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 1175/2011  
(22) Anmeldetag: 12.08.2011  
(45) Veröffentlicht am: 15.05.2013

(51) Int. Cl. : **G01S 17/89** (2006.01)  
**G01S 7/486** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:  
WO 2009061174 A1  
EP 1832897 A1

(73) Patentinhaber:  
RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS  
GMBH  
3580 HORN (AT)

(72) Erfinder:  
ZACH GERALD DR.  
WIEN (AT)  
ULLRICH ANDREAS DR.  
GABLITZ (AT)  
SPITZER ANDREA DIPL.ING.  
WIEN (AT)  
WAGENSONNER ANTON C. ING.  
WALKERSDORF AM KAMP (AT)

(54) **VERFAHREN ZUM ERZEUGEN EINER VERBESSERTEN ABTASTPUNKTEWOLKE**

(57) Ein Verfahren zum Erzeugen einer verbesserten Abtastpunktwolke aus zumindest zwei Abtastpunktwolken (5, 6) eines Multipass-MLS-Scans umfasst:  
Erstellen von Orthoprojektionen ( $OP_{i,j}(5_i)$ , ( $OP_{i,j}(6_i)$ ,  $OP_{i+1,j}(5_{i+1})$ , ( $OP_{i+1,j}(6_{i+1})$ )) der in verschiedene Raumausschnitte ( $R_i$ ) fallenden Teile ( $5_i$ ,  $6_i$ ) der Abtastpunktwolken (5, 6),  
Relativbewegen der Orthoprojektionen bis zur größtmöglichen Kongruenz ( $K$ ), um Versätze ( $v_i$ ) der Orthoprojektionen in den Raumausschnitten ( $R_i$ ) zu ermitteln.  
Korrigieren von Trajektorienabschnitten ( $3_i$ ,  $3_i'$ ,  $3_i''$ ,  $3_{i+1}$ ,  $4_i$ ,  $4_i'$ ,  $4_i''$ ,  $4_{i+1}$ ) um die ermittelten Versätze ( $v_i$ ) und dazwischen interpolierte Versätze ( $V_i'$ ,  $V_i''$ ), um korrigierte Trajektorien ( $3_c$ ,  $4_c$ ) zu erhalten,  
Neupositionieren der Abtastpunktwolken (5, 6) anhand der korrigierten Trajektorien ( $3_c$ ,  $4_c$ ) im Weltkoordinatensystem (7), und  
Erzeugen der verbesserten Abtastpunktwolke aus den neupositionierten Abtastpunktwolken ( $5_c$ ,  $6_c$ ).

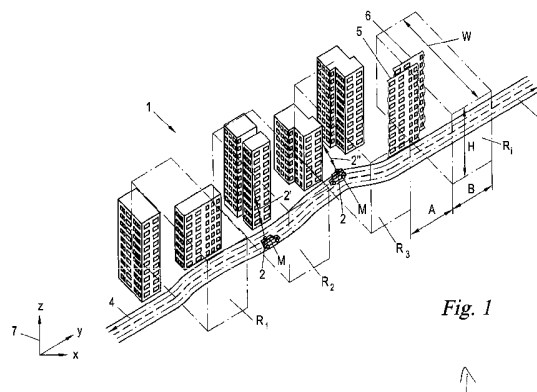


Fig. 1

## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erzeugen einer verbesserten Abtastpunktewolke aus zumindest zwei Abtastpunktewolken, von denen die erste durch Abtasten einer Umgebung mit einem entlang einer ersten Trajektorie bewegten Laserscanner und die zweite durch Abtasten derselben Umgebung mit einem entlang einer zweiten Trajektorie bewegten Laserscanner erzeugt ist, wobei die Trajektorien mit den Abtastpunktewolken in einem Weltkoordinatensystem vorliegen.

**[0002]** Abtastpunktewolken dieser Art werden von sog. „Mobile Laser Scanning“-Systemen (MLS-Systemen) erzeugt, die vor allem zur terrestrischen Landvermessung eingesetzt werden. Dabei wird die Topografie der Landschaft von einem bewegten Land-, Luft- oder Wasserfahrzeug aus erfasst, welches das MLS-System trägt. Die Scandaten des MLS-Systems bilden eine „Wolke“ von Abtastpunkten im Koordinatenraum, die ein 3D-Abbild des laserabgetasteten Umgebungsbereichs darstellen. Für die Abbildungsgenauigkeit des MLS-Systems ist es von entscheidender Bedeutung, dass seine Bewegungsbahn und -orientierung, gemessen als Abfolge von Positions- und Lagemessdaten, auch Trajektorie genannt, möglichst exakt bestimmt werden kann.

**[0003]** Zur Messung der Trajektorie des MLS-Systems wird in der Regel ein von diesem mitgeführtes Trägheitsmess-Subsystem („Inertial Measurement Unit“, IMU) in Verbindung mit einem Satellitennavigations-Subsystem („Global Navigation Satellite System“, GNSS) verwendet. Die IMU/GNSS-Subsysteme ermitteln fortlaufend Position und Lage und damit die Trajektorie des MLS-Systems im Weltkoordinatensystem, so dass die Scandaten des MLS-Systems darauf bezogen werden können, um die Abtastpunktewolken im Koordinatenraum des Weltkoordinatensystems aufzustellen.

**[0004]** In der Praxis lässt die Messgenauigkeit von IMU/GNSS-Subsystemen jedoch häufig zu wünschen übrig. Die Ursachen können mannigfaltig sein, beispielsweise Abschattungen der Line-of-Sight des GNSS-Empfängers zu den Satelliten durch Gebäude oder Vegetation, Mehrwegeausbreitung der GNSS-Signale oder vollständiger Verlust der GNSS-Signale beim Durchfahren von Tunnels. Auch nicht exakt initialisierte und damit missweisende oder fehlerhorizontierte IMU-Subsysteme verursachen Fehler, ebenso wie die Langzeitdrift von IMU-Subsystemen. Bereits Winkelabweichungen von wenigen Milligrad können über die von den Laserabtaststrahlen zurückzulegenden langen Wege zu signifikanten Mess- und damit Abbildungsfehlern des MLS-Systems führen. Alle diese Fehler zeigen sich unmittelbar in den vom MLS-System erzeugten Abtastpunktewolken bzw. 3D-Abbildern als Verzerrungen, Kantensprünge usw. der abgebildeten Umgebung.

**[0005]** Dieses Problem ist noch verschärft beim sog. Multipass-Scannen, bei welchem ein- und derselbe Umgebungsbereich mehrmals aufeinanderfolgend mit dem MLS-System abgetastet wird, um mehrere Abtastpunktewolken desselben zu erstellen, beispielsweise um diese zur Erhöhung der Punktdichte, zur Reduktion von durch Abschattungen entstandenen Datenlücken oder für weitergehende statistische 3D-Bildverbesserungsverfahren miteinander zu kombinieren. Bei jedem Scandurchgang ergeben sich jedes Mal andere Trajektorienfehler, sodass die Abtastpunktewolken der verschiedenen Scandurchgänge in der Regel voneinander geringfügig abweichen. Für den nutzbringenden Einsatz von Multipass-MLS-Verfahren ist daher eine Korrektur bzw. Reduzierung von Trajektorienfehlern essentiell, um die Abtastwolken aus den einzelnen Scandurchgängen möglichst zur Deckung zu bringen, da sie sonst nicht richtig kombiniert bzw. verarbeitet werden können.

**[0006]** Bekannte Verfahren zum Zur-Deckung-Bringen von Abtastpunktewolken aus Multipass-MLS-Scans beruhen auf einer automatischen Detektion von signifikanten Objekten („tie objects“) in den einzelnen Abtastpunktewolken, um diese abzugleichen. Zu diesem Zweck müssen entweder reale Markierungen in der Umgebung angebracht werden, was extrem arbeitsintensiv ist, oder es werden signifikante Objekte in den Abtastpunktewolken automatisch identifiziert, in der Regel Flächen oder geometrische Grundformen, welche dann zur Deckung gebracht wer-

den. Eine solche Detektion von Flächen in Punktwolken ist jedoch rechentechnisch aufwändig und gerade in Anwesenheit von Trajektorienfehlern, die zu Verzerrungen bzw. Sprüngen der Flächen führen, fehleranfällig, was zu entsprechenden Fehlzuordnungen von nicht-korrespondierenden Flächen führen kann.

**[0007]** Die Erfindung setzt sich zum Ziel, die Nachteile des Standes der Technik zu überwinden und ein verbessertes Verfahren zur Verarbeitung von Multipass-MLS-Abtastpunktwolken zu schaffen. Dieses Ziel wird mit einem Verfahren der einleitend genannten Art erreicht, welches die folgenden Schritte umfasst:

**[0008]** Erstellen zumindest einer ersten Orthoprojektion eines in einen ersten Raumausschnitt fallenden Teils der ersten Abtastpunktwolke in einer ersten Projektionsrichtung, Erstellen zumindest einer zweiten Orthoprojektion eines in den ersten Raumausschnitt fallenden Teils der zweiten Abtastpunktwolke in der ersten Projektionsrichtung, Erstellen zumindest einer dritten Orthoprojektion eines in einen zweiten Raumausschnitt fallenden Teils der ersten Abtastpunktwolke in einer zweiten Projektionsrichtung, und Erstellen zumindest einer vierten Orthoprojektion eines in den zweiten Raumausschnitt fallenden Teils der zweiten Abtastpunktwolke in der zweiten Projektionsrichtung, wobei der erste und der zweite Raumausschnitt in Trajektorienrichtung voneinander beabstandet sind,

**[0009]** Relativbewegen der ersten und der zweiten Orthoprojektion in ihrer Projektionsebene bis zur größtmöglichen Kongruenz um einen ersten Versatz, und Relativbewegen der dritten und der vierten Orthoprojektion in ihrer Projektionsebene bis zur größtmöglichen Kongruenz um einen zweiten Versatz,

**[0010]** Korrigieren von ersten Trajektorienabschnitten, von welchen die in den ersten Raumausschnitt fallenden Teile der beiden Abtastpunktwolken aus erzeugt wurden, um den ersten Versatz, Korrigieren von zweiten Trajektorienabschnitten, von welchen die in den zweiten Raumausschnitt fallenden Teile der beiden Abtastpunktwolken aus erzeugt wurden, um den zweiten Versatz, und Korrigieren von zwischenliegenden dritten Trajektorienabschnitten um zumindest einen zwischen den ersten und zweiten Versätzen interpolierten dritten Versatz, um korrigierte erste und zweite Trajektorien zu erhalten,

**[0011]** Neupositionieren der ersten und zweiten Abtastpunktwolken anhand der korrigierten ersten und zweiten Trajektorien im Weltkoordinatensystem, und

**[0012]** Erzeugen der verbesserten Abtastpunktwolke aus zumindest einer der neupositionierten ersten und zweiten Abtastpunktwolken.

**[0013]** Die Erfindung beruht auf dem neuartigen Ansatz, die beiden Abtastpunktwolken in entlang der Trajektorien voneinander beabstandeten Stützstellen, den genannten Raumabschnitten, mit Hilfe von Orthoprojektionen („Orthofotos“) automatisiert zur Deckung zu bringen und auf diese Weise Korrekturwerte, die genannten Versätze, für die Trajektorien zu ermitteln; durch Interpolation werden weitere Korrekturwerte für die zwischenliegenden Trajektorienabschnitte ermittelt und dadurch insgesamt korrigierte Trajektorien berechnet; letztere werden dann dazu verwendet, die Abtastpunktwolken im Weltkoordinatensystem korrekt neuzupositionieren. Dadurch können Trajektorienfehler im Sinne einer Mittelung von Messwerten durch die Mehrfachbefahrung (Multipass) desselben Gebietes wesentlich verringert und in der Folge eine hochgenaue verbesserte Abtastpunktwolke aus mehreren Einzel-Punktwolken eines Multipass-Scans erstellt werden. Im Gegensatz zu den bekannten Verfahren ist dazu weder die aufwändige Anbringung von realen Markierungen in der Umgebung noch eine rechenintensive 3D-Objekterkennung in den Abtastpunktwolken erforderlich, sondern es genügt ein Kongruenzabgleich von zweidimensionalen Orthoprojektionen, was durch einfaches Verschieben der Orthoprojektionen und Berechnen ihrer Korrelation durchgeführt werden kann. Dies ist auch nur in einigen wenigen, voneinander beabstandeten Raumabschnitten erforderlich, was den Rechenaufwand minimiert. Im Ergebnis wird ein hochgenaues, zuverlässiges und mit geringem Rechenaufwand vollautomatisierbares Auswerteverfahren für Abtastpunktwolken aus Multipass-MLS-Scans geschaffen.

**[0014]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung setzen sich die genannten Versätze jeweils aus einem Teilversatz für die eine und einem Teilversatz für die andere der beiden Orthoprojektionen eines Raumausschnitts und damit Trajektorienabschnitte zusammen. Dadurch werden die Abtastpunktewolken in den genannten Raumabschnitten einander genähert, nicht bloß die eine zur anderen hinbewegt, was einer Mittelung statistisch unabhängiger Trajektorienfehler entspricht und diese somit weiter reduziert.

**[0015]** In einer ersten Ausführungsform der Erfindung sind die genannten beiden Teilversätze jeweils gleich groß und einander entgegengesetzt. Dadurch werden die beiden Trajektorien symmetrisch gemittelt.

**[0016]** Alternativ werden die genannten Teilversätze mit der lokalen Messgenauigkeit der jeweiligen Abtastpunktewolke und/oder der jeweiligen Trajektorie gewichtet, wodurch die Korrektorgenauigkeit im statistischen Mittel weiter erhöht werden kann.

**[0017]** In jedem Fall ist es besonders günstig, wenn jeweils zumindest zwei Stück erste, zweite, dritte und vierte Orthoprojektionen in jeweils zueinander orthogonalen Projektionsrichtungen erstellt werden, um translatorische Versätze in allen drei Raumrichtungen ermitteln zu können. Alternativ oder zusätzlich können auch jeweils zumindest zwei Stück erste, zweite, dritte und vierte Orthoprojektionen in jeweils zueinander parallelversetzten Projektionsrichtungen erstellt werden, wodurch translatorisch-rotative Versätze ermitteln werden können, wie später noch ausführlicher erläutert wird.

**[0018]** Bevorzugt sind die Raumausschnitte Quader, welche etwa normal zur lokalen Trajektorienrichtung liegen, und die genannten ersten und zweiten Projektionsrichtungen zur lokalen Trajektorienrichtung jeweils etwa gleich gerichtet, was die Berechnung erleichtert.

**[0019]** Besonders günstig ist es, wenn der genannte Abstand der Raumausschnitte das 3- bis 20-fache, bevorzugt 5- bis 10-fache ihrer Erstreckung in lokaler Trajektorienrichtung beträgt. Dies stellt einen guten Kompromiss zwischen Reduzierung des Rechenaufwands einerseits und Verbesserung der Korrektorgenauigkeit andererseits dar.

**[0020]** Aus den neupositionierten Abtastpunktewolken können auf verschiedenste Arten und Weisen verbesserte Abtastpunktewolken erzeugt werden, sei es indem z.B. eine von ihnen nur direkt die verbesserte Abtastpunktewolke darstellt. Bevorzugt wird die verbesserte Abtastpunktewolke durch Vereinigen der Punktemengen der neupositionierten ersten und der zweiten Abtastpunktewolke erzeugt, sodass sich eine verbesserte Abtastpunktewolke mit erhöhter Punktdichte ergibt.

**[0021]** Die Erfindung wird nachstehend anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die begleitenden Zeichnungen näher erläutert, in denen zeigen:

**[0022]** Fig. 1 das Bilden von Raumausschnitten von Abtastpunktewolken entlang ihrer zugrundeliegenden Trajektorien in einer schematischen Perspektivansicht;

**[0023]** Fig. 2 einen der Raumausschnitte von Fig. 1 in vergrößerter Perspektivansicht mit zwei beispielhaften Abtastpunktewolken-Teilen (hier: eines Baumes) darin;

**[0024]** die Fig. 3a bis 3c beispielhafte Orthoprojektionen der Abtastwolken-Teile des Raumausschnitts von Fig. 2 in drei verschiedenen Projektionsrichtungen jeweils aus zwei verschiedenen Scandurchgängen;

**[0025]** Fig. 4 die Kreuzkorrelation der Orthoprojektionen von Fig. 3c zur Ermittlung ihres Versatzes für größtmögliche Kongruenz;

**[0026]** Fig. 5 schematisch die Ermittlung des Versatzes zwischen zwei Abtastpunktewolken-Punkten zur Korrektur ihrer ursächlichen Trajektorien-Punkte;

**[0027]** Fig. 6 eine schematisierte Draufsicht auf Fig. 1 zur Veranschaulichung der Trajektorienkorrektur;

**[0028]** und Fig. 7 zwei in derselben Projektionsrichtung erzeugte Orthoprojektionen zur Ermittlung rotativ-translatorischer Versätze.

**[0029]** In Fig. 1 ist beispielhaft eine Umgebung 1 in Form eines Straßenzuges gezeigt, welcher von einem mobilen Laserscanner 2 abgetastet wird, der von einem Beförderungsmittel M entlang der Umgebung 1 gemäß einer Trajektorie 3 hin und gemäß einer zweiten Trajektorie 4 her bewegt wird, z.B. von einem Auto auf den Hin- und Rückfahrbahnen des Straßenzugs. Der Laserscanner 2 verschwenkt z.B. fortlaufend einen oder mehrere Abtast-Laserstrahlen 2', 2'' über einen Winkelbereich in einer oder mehreren Abtastebenen, die zu den Trajektorien 3, 4 normal oder zumindest geneigt sind. Durch Vorwärtsbewegen des gesamten Laserscanners 2 entlang der Trajektorien 3, 4, durch Laufzeit- und damit Entfernungsmessungen an den umgebungsreflektierten Laserstrahlen und in Kenntnis ihrer jeweiligen Aussendepositionen und -winkel auf den Trajektorien 3, 4 kann ein gesamtes 3D-Abbild der Umgebung 1 in Form einer sogenannten „Punktwolke“ von Abtastpunkten erstellt werden. Für jeden Scandurchgang (Pass) entlang einer der Trajektorien 3, 4 wird so eine gesonderte Abtastpunktwolke 5, 6 der Umgebung 1 in einem Weltkoordinatensystem 7 erstellt. Die Trajektorien 3, 4 verlaufen zueinander im Wesentlichen parallel, können aber auch lokalen Abweichungen unterliegen, z.B. wegen unterschiedlicher Fahrspurführungen, Umwege oder Hindernisse, oder sich sogar kreuzen, z.B. bei Straßenkreuzungen.

**[0030]** Es versteht sich, dass hierfür grundsätzlich jede Art von Laserscanner 2 geeignet ist, der bei kontinuierlicher (oder abschnittsweiser) Vorwärtsbewegung entlang einer Trajektorie 3, 4 - jeweils aus der Kenntnis seiner eigenen aktuellen Position und Lage im Weltkoordinatensystem 7, der Aussenderichtung seines Laserstrahls und der Laufzeitmessung an seinem Laserstrahl - die Entfernung zu einem Abtastpunkt der Umgebung 1 messen und diesen damit im Weltkoordinatensystem 7 positionieren kann, um aus einer Vielzahl solcher Punktmessungen die Abtastpunktwolken 5, 6 als 3D-Abbilder der Umgebung 1 im Weltkoordinatensystem 7 zu stellen. Beispielsweise könnte sich der Laserscanner auch aus mehreren Einzel-Scannern in der Art eines Laser-Messsystems zusammensetzen, welches die genannte Funktion ausführt.

**[0031]** Der Laserscanner 2 kann die Abtastpunktwolken 5, 6 z.B. in einem Computerspeicher, sei es direkt im Laserscanner 2 oder einer damit in Verbindung stehenden Datenverarbeitungsanlage, ablegen. Es versteht sich, dass anstelle von zwei Scandurchgängen entlang zweier Trajektorien 3, 4 auch mehr als zwei Scandurchgänge mit einer entsprechend vielfachen Anzahl von Trajektorien 3, 4 und Abtastpunktwolken 5, 6 durchgeführt werden können.

**[0032]** Der Laserscanner 2 bestimmt seine jeweils aktuelle Position und Lage im Weltkoordinatensystem 7 - und damit die Trajektorien 3, 4 im Weltkoordinatensystem 7 - mittels jeglicher in der Technik bekannter Positionsbestimmungsmittel, in der Regel mittels eines eingebauten Satellitennavigationsempfänger (global navigation satellite System, GNSS) und/oder einer eingebauten Trägheitsmesseinrichtung (inertial measurement unit, IMU). Nach den Scandurchgängen entlang der Trajektorien 3, 4 liegen somit einerseits die Abtastpunktwolken 5, 6 und andererseits die Trajektorien 3, 4, von denen erstere aus erzeugt wurden, im Koordinatenraum des Weltkoordinatensystems 7 vor. Die Abtastpunktwolken 5, 6 könnten in einem Zwischenschritt zunächst auf die Trajektorien 3, 4 bezogen vorliegen, d.h. auf das lokale Koordinatensystem des Laserscanners 2, welches entlang der Trajektorien 3, 4 bewegt wird; und anschließend könnten aus der bekannten Lage der Trajektorien 3, 4 im Weltkoordinatensystem 7 die Abtastpunktwolken 5, 6 im Weltkoordinatensystem 7 positioniert werden.

**[0033]** Wenn die Lage der Trajektorien 3, 4 im Weltkoordinatensystem 7 mit Hilfe der IMU/GNSS-Ausrüstung des Laserscanners 2 exakt bestimmbar ist, fallen die Abtastpunktwolken 5, 6 im Wesentlichen exakt zusammen, sodass sie z.B. direkt zu einer einzigen Ergebnis-Abtastpunktwolke vereinigt werden können, d.h. durch Zusammenfassen ihrer jeweiligen Abtastpunkte-Mengen zu einer einzigen großen Menge von Abtastpunkten. Es ist zu beachten, dass dazu die Trajektorien 3, 4 selbst nicht zusammenfallen müssen, sondern lediglich ihre

Lage im Weltkoordinatensystem 7 exakt bekannt sein muss: Unterschiedliche Verläufe der einzelnen Trajektorien 3, 4 werden automatisch dadurch berücksichtigt, dass der Laserscanner 2 den Aussendewinkel seines Laserstrahls von der jeweiligen Trajektorie 3, 4 jederzeit kennt.

**[0034]** In der Realität unterliegt die Bestimmungsgenauigkeit der Trajektorien 3, 4 zahlreichen Messfehlern, z.B. durch Messungenauigkeiten von IMU/GNSS-Systemen aufgrund von Mehrwegeausbreitungen oder Signalverlusten der GNSS-Signale, Rauschen und Drift von IMU-Subsystemen usw. Die Entfernungsmessgenauigkeit von Laserscannern 2 in Bezug auf die von ihnen abgetasteten Punkte der Umgebung 1 ist um ein Vielfaches höher, sodass in der Praxis von einer weitgehend exakten Lage der Abtastpunktewolken 5, 6 zu den Trajektorien 3, 4, nicht aber der Trajektorien 3, 4 zum Weltkoordinatensystem 7 auszugehen ist.

**[0035]** Wenn daher die Abtastpunktewolken 5, 6 auf Basis der Trajektorien 3, 4 im Weltkoordinatensystem 7 positioniert werden, unterliegen sie direkt den Messfehlern der Trajektorien 3, 4. Jeder Versatz, jede Abweichung der Trajektorien 3, 4 führt unmittelbar zu einer gleichlaufenden Versetzung bzw. Abweichung der Abtastpunkte in den Abtastpunktewolken 5, 6. Mehrfache Abtastpunktewolken 5, 6 aus Multipass-MLS-Scans können nicht mehr korrekt zu einer Ergebnis-Abtastpunktewolke vereinigt werden, weil die Trajektorienmessfehler sich darin summieren und zu einem unscharfen 3D-Abbild führen. Abtastpunktewolken 5, 6 aus Multipass-MLS-Scans müssen daher einer Nachbearbeitung und Korrektur hinsichtlich der Trajektorienmessfehler unterzogen werden, wozu das im Folgenden beschriebene Verfahren dient. Das Verfahren führt gleichzeitig zu einer Verbesserung der Messgenauigkeit der Trajektorien 3, 4, was zur Verbesserung der Positionierungsgenauigkeit auch nur einer einzigen Abtastpunktewolke 5, 6 herangezogen werden kann, falls gewünscht.

**[0036]** In einem ersten Schritt werden entlang der Trajektorien 3, 4 Raumausschnitte  $R_1, R_2, \dots$  allgemein  $R_i$ , mit einem gegenseitigen Abstand  $A$  aus dem Koordinatenraum des Weltkoordinatensystems 7 ausgewählt, sodass in jedem Raumausschnitt  $R_i$  jeweils Teile  $5_i, 6_i$  (Fig. 2) der Abtastpunktewolken 5, 6 fallen. Die Raumausschnitte  $R_i$  können an sich beliebige Form haben, z.B. die Form einer Kugel, eines Rotationsellipsoids oder bevorzugt eines dünnen Quaders („slice“) mit einer Dicke  $B$  in der - an eine der Trajektorien 3, 4 geknüpften oder zwischen diesen gemittelten - lokalen Trajektorienrichtung  $D_{3,4}$  von ca. 1 - 2 m, einer Höhe  $H$  von ca. 10 - 20 m und einer Breite  $W$  von ca. 20 - 50 m. Es versteht sich, dass die Größe  $B \times H \times W$  der Raumausschnitte  $R_i$  an die Strukturdichte („Granularität“) der abgetasteten Umgebung 1 angepasst wird, um in jedem Raumausschnitt  $R_i$  ausreichend strukturierte Abtastpunktewolken-Teile  $5_i, 6_i$  zur Verfügung zu haben, welche möglichst eindeutig korrelierbar sind, wie später anhand von Fig. 5 noch ausführlicher erläutert wird.

**[0037]** Der gegenseitige Abstand  $A$  der Raumausschnitte  $R_i$  entlang der Trajektorien 3, 4 wird als Kompromiss zwischen Reduzierung des Rechenaufwands (große Abstände  $A$  und wenige Raumausschnitte  $R_i$ ) und Erhöhung der Genauigkeit (kleine Abstände  $A$  und viele Raumausschnitte  $R_i$ ) gewählt. Ein guter Kompromiss ist  $2B \leq A \leq 50B$ , bevorzugt  $3B \leq A \leq 20B$ , insbesondere bevorzugt  $5B \leq A \leq 10B$ .

**[0038]** Die Raumausschnitte  $R_i$  müssen nicht notwendigerweise äquidistant angeordnet sein. Der Abstand  $A$  kann beispielsweise auch lokal bedingt variieren, um einzelne Objekte besser zu erfassen. Auch ein gemäß gleichen Zeitintervallen während des Abfahrens der Trajektorien sich einstellender Abstand  $A$  ist möglich.

**[0039]** Fig. 2 zeigt einen der Raumausschnitte  $R_i$  im Detail. Die in den Raumausschnitt  $R_i$  fallenden Teile der Abtastpunktewolken 5, 6 sind mit  $5_i, 6_i$  bezeichnet und jene Abschnitte der Trajektorien 3, 4, von welchen aus die Abtastpunktewolken-Teile  $5_i, 6_i$  gescannt wurden, mit  $3_i, 4_i$ . Als Beispiel für solche Abtastpunktewolken-Teile  $5_i, 6_i$  ist hier der Einfachheit halber ein Baum dargestellt; in der Praxis kann es sich auch um Gebäude- bzw. Fassadenteile, Straßeneinrichtungen usw. handeln, wie in Fig. 1 gezeigt.

**[0040]** Aufgrund der erörterten Messfehler der Trajektorienabschnitte  $3_i, 4_i$  sind die Abtastpunktewolken-Teile  $5_i, 6_i$  zueinander um einen Versatz  $v_i$  versetzt, wie anhand der stellvertretenden

Abtastpunkte S1(5) und S1(6) dargestellt ist. Jene lokalen Punkte auf den Trajektorien 3, 4, von welchen die Punkte S1(5) und S1(6) aus gescannt wurden, sind mit T1(3) und T1(4) bezeichnet. Es ist zu beachten, dass der Versatz  $v_i$  zwischen den Punkten S1(5) und S1(6) der Abtastpunktewolken-Teile  $5_i$  und  $6_i$  nicht ident ist mit der Lageabweichung  $l_i$  zwischen ihren ursächlichen Trajektorienpunkten T1(3) und T1(4), weil die Trajektorien 3, 4 z.B. von Fahrten auf verschiedenen Fahrbahnen herrühren, sondern sich (bloß) aus den lokalen Messfehlern  $a_i$  und  $b_i$  der Trajektorien 3 und 4 in den Punkten T1(3), T1(4) gegenüber ihrer korrekten Lage im Weltkoordinatensystem 7 zusammensetzt.

**[0041]** Der Versatz  $v_i$  kann dabei sowohl ein rein translatorischer Versatz sein, wie durch den räumlichen Vektor in Fig. 2 beispielhaft veranschaulicht, oder ein rotativer bzw. translatorisch-rotativer Versatz, d.h. dass die Abtastpunktewolken-Teile  $5_i$ ,  $6_i$  zueinander (auch) lokal „verdrehen“ sind (lokale Verzerrungen bzw. Scherungen in den Abtastpunktewolken); alle diese Varianten fallen unter den hier verwendeten Begriff „Versatz“. Es versteht sich, dass ein translatorisch-rotativer Versatz  $v_i$  nicht mehr durch einen Vektor, sondern eine entsprechende Transformationsmatrix darzustellen ist.

**[0042]** Zur Bestimmung des Versatzes  $v_i$  im Raumausschnitt  $R_i$  werden zumindest eine, bevorzugt zwei oder mehr Orthoprojektionen  $OP_{i,1}$ ,  $OP_{i,2}$  ..., allgemein  $OP_{i,j}$ , der Abtastpunktewolken-Teile  $5_i$  und  $6_i$  in einer, zwei oder mehr Projektionsrichtungen  $P_1$ ,  $P_2$  ..., allgemein  $P_j$ , erstellt. Die Fig. 3a bis 3c zeigen jeweils zwei Orthoprojektionen  $OP_{i,1}(5_i)$  und  $OP_{i,1}(6_i)$ ;  $OP_{i,2}(5_i)$  und  $OP_{i,2}(6_i)$ ; sowie  $OP_{i,3}(5_i)$  und  $OP_{i,3}(6_i)$  in drei Projektionsrichtungen  $P_1$  (Fig. 3a),  $P_2$  (Fig. 3b),  $P_3$  (Fig. 3c), welche bevorzugt - nicht notwendigerweise - parallel ( $P_2$ ) bzw. normal ( $P_1$ ,  $P_3$ ) zur lokalen Trajektorienrichtung  $D_{3,4}$  im Raumausschnitt  $R_i$  - und damit normal auf dessen Quaderseiten - liegen. Der Einfachheit halber wurde in Fig. 2 angenommen, dass die lokale Trajektorienrichtung  $D_{3,4}$  auch anti-parallel zur x-Achse des Weltkoordinatensystems 7 liegt, was in der Regel nicht der Fall ist.

**[0043]** Unter einer „Orthoprojektion“ wird eine Abbildung des in den jeweiligen Raumausschnitt  $R_i$  fallenden Abtastpunktewolken-Teiles  $5_i$ ,  $6_i$  verstanden, welche alle Abtastpunkte S1, S2 ... des jeweiligen Teiles  $5_i$  bzw.  $6_i$  entlang zur Projektionsrichtung  $P_j$  parallelen Blick- bzw. Projektionsstrahlen auf eine zur Projektionsrichtung  $P_j$  normale Abbildungs- bzw. Projektionsebene  $E_j$  projiziert, was in der Literatur auch als „echtes Orthofoto“ („True Ortho-Image“) bezeichnet werden. In der Projektionsebene  $E_1$  der Orthoprojektionen von Fig. 3a zeigt sich der Versatz  $v_i$  projiziert als  $v_{i,1}$ ; in der Projektionsebene  $E_2$  der Orthoprojektionen von Fig. 3b zeigt sich der Versatz  $v_i$  projiziert als  $v_{i,2}$ ; und in der Projektionsebene  $E_3$  der Orthoprojektionen von Fig. 3c zeigt sich der Versatz  $v_i$  projiziert als  $v_{i,3}$ .

**[0044]** Durch Relativbewegen der Orthoprojektion  $OP_{i,1}(5_i)$  des ersten Abtastpunktewolken-Teils  $5_i$  gegenüber der Orthoprojektion  $OP_{i,1}(6_i)$  des zweiten Abtastpunktewolken-Teils  $6_i$  in der Projektionsebene  $E_1$  soweit, bis sie größtmöglich kongruent bzw. deckungsgleich sind, lässt sich somit der projizierte Versatz  $v_{i,1}$  ermitteln; durch Relativbewegen der Orthoprojektionen in den Ebenen  $E_2$  und  $E_3$  lassen sich in analoger Weise die projizierten Versätze  $v_{i,2}$  und  $v_{i,3}$  ermitteln; und aus zumindest zwei der projizierten Versätze  $v_{i,1}$ ,  $v_{i,2}$  und  $v_{i,3}$  lässt sich ein translatorisch-räumlicher Versatz  $v_i$  der Abtastpunktewolken-Teile  $5_i$  und  $6_i$  im Raumausschnitt  $R_i$  ermitteln.

**[0045]** Das erörterte „Relativbewegen bis zur maximalen Kongruenz“ entspricht mathematisch einer zweidimensionalen Kreuzkorrelation zwischen den jeweils betrachteten Orthoprojektionen  $OP_{i,j}(5_i)$  und  $OP_{i,j}(6_i)$ , wie sie in Fig. 4 für zwei Relativverschiebungswege  $\Delta x$  und  $\Delta y$  in der Ebene  $E_3$  gezeigt ist und bei maximaler Kongruenz einen Peak 7 des Kreuzkorrelationswerts  $K$  aufweist, der somit den Versatz  $v_{i,3}(\Delta x, \Delta y)$  anzeigt.

**[0046]** Es versteht sich, dass in vereinfachten Ausführungsformen des Verfahrens der Versatz  $v_i$  näherungsweise nur aus den Orthoprojektionen einer einzigen Projektionsrichtung  $P_j$  ermittelt wird, was nur die Bestimmung des Versatzes  $v_i$  in zwei Dimensionen erlaubt; bevorzugt wird der Versatz  $v_i$  jedoch wie gezeigt aus Orthoprojektionen in zwei oder mehr Projektionsrichtungen  $P_j$  ermittelt, um ihn in allen drei Dimensionen zu bestimmen. Die Projektionsrichtungen  $P_j$  müssen nicht zwingend parallel bzw. normal zur lokalen Trajektorienrichtung  $D_{3,4}$  liegen, dies ist jedoch

günstig, wenn auch der Raumausschnitt  $R_i$  so definiert wird, weil es die Berechnung vereinfacht.

**[0047]** Der für den Raumausschnitt  $R_i$  ermittelte Versatz  $v_i$  der Abtastpunktewolken-Teile  $5_i, 6_i$  wird nun dazu verwendet, die zugehörigen Trajektorienabschnitte  $3_i, 4_i$  zu korrigieren, und zwar wie folgt.

**[0048]** Fig. 5 zeigt den Korrekturschritt für die Trajektorienabschnitte  $3_i, 4_i$  im Raumausschnitt  $R_i$  anhand zweier stellvertretender Trajektorienpunkte  $T1(3), T1(4)$  derselben („0“ bezeichnet den Koordinatenursprung des Weltkoordinatensystems 7). Der Versatz  $v_i$  wird dazu verwendet, die Trajektorienabschnitte  $3_i, 4_i$  so zurechtzurücken bzw. zu korrigieren, dass die zugehörigen Abtastpunktewolken-Teile  $5_i, 6_i$  (stellvertretend anhand der Abtastpunkte  $S1(5), S1(6)$  gezeigt) - wenn sie auf Basis der Trajektorienabschnitte  $3_i, 4_i$  im Weltkoordinatensystem 7 positioniert werden - maximal kongruent sind.

**[0049]** Dies kann im einfachsten Fall dadurch geschehen, dass nur einer der Trajektorienabschnitte  $3_i, 4_i$  um den gesamten Versatz  $v_i$  korrigiert wird, oder - wie dargestellt und bevorzugt - der Versatz  $v_i$  in einen ersten Teilversatz  $v_{i,a}$  und einen zweiten Teilversatz  $v_{i,b}$  aufgeteilt wird, welche Teilversätze jeweils auf einen Trajektorienabschnitt  $3_i, 4_i$  angewandt werden.

**[0050]** Die Teilversätze  $v_{i,a}$  und  $v_{i,b}$  können jeweils gleich groß und einander entgegengesetzt sein, sodass die Fehlerkorrekturen zwischen den beiden Trajektorien  $3, 4$  gleich verteilt bzw. gemittelt angewandt wird. Optional können bei der Aufteilung des Versatzes  $v_i$  die lokalen Messgenauigkeiten der Abtastpunktewolken  $5, 6$  und/oder Trajektorien  $3, 4$  berücksichtigt werden: So liefern moderne Laserscanner 2 mit den Entfernungswerten der Abtastpunkte  $S1, S2...$  oft auch gleich ein (geschätztes) Maß über die Messgenauigkeit mit, und moderne IMU/GNSS-Systeme ebenso ein (geschätztes) Maß über die Messgenauigkeit der von ihnen ermittelten Trajektorienpunkte  $T1, T2...$ . Der Versatz  $v_i$  kann daher entsprechend den Messgenauigkeiten in unterschiedliche Teilversätze  $v_{i,a}$  und  $v_{i,b}$  aufgeteilt werden, u.zw. indem der Versatz  $v_i$  für jede der Abtastpunktewolken  $5, 6$  mit der lokalen, den Raumausschnitt  $R_i$  betreffenden Messgenauigkeit des jeweiligen Abtastpunktewolken-Teils  $5_i, 6_i$  und/oder des jeweiligen Trajektorienabschnitts  $3_i, 4_i$  gewichtet wird, d.h.

**[0051]**  $v_{i,a} = v_i \cdot \text{Genauigkeit}(3_i; 5_i)$

**[0052]**  $v_{i,b} = v_i \cdot \text{Genauigkeit}(4_i; 6_i)$  mit der Randbedingung

**[0053]**  $v_{i,a} + v_{i,b} = v_i$ .

**[0054]** Wenn beispielsweise die lokale Messgenauigkeit des Trajektorienabschnitts  $4_i$  besser ist als jene des Trajektorienabschnitts  $3_i$ , wird der Versatz  $v_i$  so aufgeteilt, dass der erste Teilversatz  $v_{i,a}$ , um welchen der „ungenauere“ Trajektorienabschnitt  $3_i$  korrigiert wird, größer ist als der zweite Teilversatz  $v_{i,b}$ , um den der „genaue“ Trajektorienabschnitt  $4_i$  korrigiert wird. In gleicher Weise kann die lokale Messgenauigkeit der Abtastpunktewolken-Teile  $5_i, 6_i$  in die Aufteilung eingehen.

**[0055]** Bei mehr als zwei Trajektorien  $3, 4$  innerhalb eines Raumausschnittes  $R_i$  ist eine entsprechende Ausgleichsrechnung erforderlich.

**[0056]** Wie in Fig. 6 gezeigt, werden die Trajektorienabschnitte  $3_i, 4_i$  nun in jedem der Raumausschnitte  $R_i$  wie oben beschrieben um die jeweiligen Versätze  $v_i$  bzw. Teilversätze  $v_{i,a}, v_{i,b}$  korrigiert, wobei die Projektionsrichtungen  $P_j$ , in denen die Versätze  $v_i$  in den verschiedenen Raumausschnitten  $R_i$  bestimmt werden, nicht notwendigerweise gleich sind, sondern z.B. von Raumausschnitt zu Raumausschnitt variieren können, bevorzugt mit der lokalen Trajektorienrichtung  $D_{3,4}$  des jeweiligen Raumausschnitts  $R_i$ .

**[0057]** Darüber hinaus werden auch in den Abständen  $A$  zwischen den Raumausschnitten  $R_i$  interpolierte Korrekturen an den Trajektorien  $3, 4$  vorgenommen. Dazu werden in zumindest einem zwischenliegenden Trajektorienabschnitt  $3', 3''$  bzw.  $4', 4''$  interpolierte Versätze  $v_i', v_i''$  bzw. Teilversätze  $v_{i,a}', v_{i,a}''$  bzw.  $v_{i,b}', v_{i,b}''$  angewandt. Die interpolierten Versätze  $v_i', v_i''$  (bzw. ihre Teilversätze) werden durch zeit- oder bevorzugt wegbezogene Interpolation zwischen den

Versätzen  $v_i, v_{i+1}$  der Nachbarabschnitte  $3_i, 3_{i+1}$  bzw.  $4_i, 4_{i+1}$  berechnet. Dabei kann es sich im einfachsten Fall um eine lineare Interpolation über den Abstand  $A$  bzw. den Wegverlauf der Trajektorien 3,4 handeln, z.B.

**[0058]** bei translatorischen Versätzen mit zwei äquidistant zwischenliegenden Abschnitten:

**[0059]**  $v_i' = v_i + F_i' (v_{i+1} - v_i)$

**[0060]**  $v_i'' = v_i + F_i'' (v_{i+1} - v_i),$

**[0061]** mit

**[0062]**  $F_i' = 1/3; F_i'' = 2/3,$  bzw. allgemein mit  $(m - 1)$  zwischenliegenden Abschnitten:

**[0063]**  $F_i' = 1/m;$

**[0064]**  $F_i'' = 2/m;$

**[0065]**  $F_i''' = 3/m; usw. usf.$

**[0066]** Alternativ können Interpolationen höherer Ordnung angewendet werden, z.B. quadratische Näherungskurven zwischen den Versätzen  $v_i$  als Stützstellen der Interpolation, wie in Fig. 6 gezeigt.

**[0067]** Dadurch ergeben sich neue, korrigierte Trajektorien  $3_C, 4_C,$  welche wiederum als Basis für eine Neupositionierung der auf sie zurückgehenden Abtastpunktewolken 5, 6 im Weltkoordinatensystem 7 herangezogen werden. Im Ergebnis werden neupositionierte, korrigierte Abtastpunktewolken  $5_C, 6_C$  erhalten (nicht dargestellt), welche nunmehr weitgehend kongruent sind und ein verbessertes Abtastergebnis der Umgebung 1 darstellen.

**[0068]** Die neupositionierten Abtastpunktewolken  $5_C, 6_C$  können jeweils für sich eine verbesserte Ergebnis-Abtastpunktewolke darstellen, oder alternativ - z.B. durch Vereinigen ihrer Punktmengen - kombiniert werden, um eine verbesserte Abtastpunktewolke mit doppelter Punktdichte zu ergeben. Durch entsprechende Vervielfachung des geschilderten Verfahrens für mehr als zwei Abtastpunktewolken 5, 6 können verbesserte Ergebnis-Abtastpunktewolken mit noch höherer Punktdichte erzielt werden.

**[0069]** Bislang wurde davon ausgegangen, dass durch Deckungsabgleich zwischen translatorisch verschobenen Orthoprojektionen in den Raumausschnitten  $R_i$  translatorische Versätze  $v_i$  zur translatorischen Korrektur der Trajektorien 3, 4 ermittelt werden. Es ist jedoch auch möglich, rotativ-translatorische Versätze  $v_i$  zu ermitteln, indem die Orthoprojektionen  $OP_{i,j}(5_i)$  und  $OP_{i,j}(6_i)$  nicht nur in ihren Abbildungsebenen  $E_j$  gegeneinander verschoben werden, sondern auch gegeneinander verdreht, bis optimale Kongruenz erzielt wird. Dies erfordert eine dreidimensionale Korrelation (zwei Verschiebedimensionen, eine Rotationsdimension), was rechenintensiv werden kann. Fig. 7 zeigt eine spezielle Ausführungsform des vorgestellten Verfahrens zur zusätzlichen Ermittlung rotativer Versätze  $v_i$  mit verringertem Rechenaufwand, indem die Rotation um eine Achse 8 durch Auswertung unterschiedlicher Translationen an voneinander entfernten Bildrändern von Orthoprojektionen einer Projektionsrichtung angenähert wird.

**[0070]** Gemäß Fig. 7 wird dazu eine der Orthoprojektionen der Fig. 3a - 3c in zwei „Bildhälften“ L, R geteilt, welche jeweils auch als eigenständige Orthoprojektionen  $OP_{i,j}(5_i)_L$  und  $OP_{i,j}(5_i)_R$  sowie  $OP_{i,j}(6_i)_L$  und  $OP_{i,j}(6_i)_R$  in ein und derselben Projektionsrichtung  $P_j$  aufgefasst werden können. Bei dem Beispiel von Fig. 7 befinden sich im Raumausschnitt  $R_i$  in Projektionsrichtung  $P_j$  gesehen gerade zwei Bäume in den Bildhälften L, R, um zu zeigen, dass ein rotativer Versatz zwischen den beiden Abtastpunktewolken-Teilen  $5_i, 6_i$  sich in unterschiedlichen Versätzen  $v_{i,L}$  und  $v_{i,R}$  in den beiden Bildhälften bzw. L, R niederschlägt. Aus dem Versatzunterschied  $v_{i,2} - v_{i,R}$  lässt sich somit - in Kenntnis der entsprechenden Entfernungen - der rotative Anteil des Versatzes  $v_i$  um die (hier) in der Zeichenebene vertikale Achse 8 ermitteln. In gleicher Weise lassen sich rotative Anteile der Versätze um andere Achsen ermitteln.

**[0071]** Die Erfindung ist nicht auf die dargestellten Ausführungsformen beschränkt, sondern umfasst alle Varianten und Modifikationen, die in den Rahmen der angeschlossenen Ansprüche fallen.

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Erzeugen einer verbesserten Abtastpunktewolke aus zumindest zwei Abtastpunktewolken (5, 6), von denen die erste (5) durch Abtasten einer Umgebung (1) mit einem entlang einer ersten Trajektorie (3) bewegten Laserscanner (2) und die zweite (6) durch Abtasten derselben Umgebung (1) mit einem entlang einer zweiten Trajektorie (4) bewegten Laserscanner (2) erzeugt ist, wobei die Trajektorien (3, 4) mit den Abtastpunktewolken (5, 6) in einem Weltkoordinatensystem (7) vorliegen, umfassend:

Erstellen zumindest einer ersten Orthoprojektion ( $OP_{i,j}(5_i)$ ) eines in einen ersten Raumausschnitt ( $R_i$ ) fallenden Teils ( $5_i$ ) der ersten Abtastpunktewolke (5) in einer ersten Projektionsrichtung ( $P_j$ ), Erstellen zumindest einer zweiten Orthoprojektion ( $OP_{i,j}(6_i)$ ) eines in den ersten Raumausschnitt ( $R_i$ ) fallenden Teils ( $6_i$ ) der zweiten Abtastpunktewolke (6) in der ersten Projektionsrichtung ( $P_j$ ), Erstellen zumindest einer dritten Orthoprojektion ( $OP_{i+1,j}(5_{i+1})$ ) eines in einen zweiten Raumausschnitt ( $R_{i+1}$ ) fallenden Teils ( $5_{i+1}$ ) der ersten Abtastpunktewolke (5) in einer zweiten Projektionsrichtung ( $P_j$ ), und Erstellen zumindest einer vierten Orthoprojektion ( $OP_{i+1,j}(6_{i+1})$ ) eines in den zweiten Raumausschnitt ( $R_{i+1}$ ) fallenden Teils ( $6_{i+1}$ ) der zweiten Abtastpunktewolke (6) in der zweiten Projektionsrichtung ( $P_j$ ), wobei der erste und der zweite Raumausschnitt ( $R_i, R_{i+1}$ ) in Trajektorienrichtung ( $D_{3,4}$ ) voneinander beabstandet sind,

Relativbewegen der ersten und der zweiten Orthoprojektion ( $OP_{i,j}(5_i), OP_{i,j}(6_i)$ ) in ihrer Projektionsebene ( $E_j$ ) bis zur größtmöglichen Kongruenz (K) um einen ersten Versatz ( $v_i$ ), und Relativbewegen der dritten und der vierten Orthoprojektion ( $OP_{i+1,j}(5_{i+1}), OP_{i+1,j}(6_{i+1})$ ) in ihrer Projektionsebene ( $E_j$ ) bis zur größtmöglichen Kongruenz (K) um einen zweiten Versatz ( $v_{i+1}$ ),

Korrigieren von ersten Trajektorienabschnitten ( $3_i, 4_i$ ), von welchen die in den ersten Raumausschnitt ( $R_i$ ) fallenden Teile ( $5_i, 6_i$ ) der beiden Abtastpunktewolken (5, 6) aus erzeugt wurden, um den ersten Versatz ( $v_i$ ), Korrigieren von zweiten Trajektorienabschnitten ( $3_{i+1}, 4_{i+1}$ ), von welchen die in den zweiten Raumausschnitt ( $R_{i+1}$ ) fallenden Teile ( $5_{i+1}, 6_{i+1}$ ) der beiden Abtastpunktewolken (5, 6) aus erzeugt wurden, um den zweiten Versatz ( $v_{i+1}$ ), und Korrigieren von zwischenliegenden dritten Trajektorienabschnitten ( $3'_i, 3''_i, 4'_i, 4''_i$ ) um zumindest einen zwischen den ersten und zweiten Versätzen ( $v_i, v_{i+1}$ ) interpolierten dritten Versatz ( $v'_i, v''_i$ ), um korrigierte erste und zweite Trajektorien ( $3_C, 4_C$ ) zu erhalten,

Neupositionieren der ersten und zweiten Abtastpunktewolken (5, 6) anhand der korrigierten ersten und zweiten Trajektorien ( $3_C, 4_C$ ) im Weltkoordinatensystem (7), und

Erzeugen der verbesserten Abtastpunktewolke aus zumindest einer der neupositionierten ersten und zweiten Abtastpunktewolken ( $5_C, 6_C$ ).

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die genannten Versätze ( $v_i$ ) sich jeweils aus einem Teilversatz ( $v_{i,a}$ ) für die eine und einem Teilversatz ( $v_{i,b}$ ) für die andere der beiden Orthoprojektionen ( $OP_{i,j}(5_i), OP_{i,j}(6_i)$ ) eines Raumausschnitts ( $R_i$ ) und damit Trajektorienabschnitte ( $3_i, 4_i$ ) zusammensetzen.
3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die genannten beiden Teilversätze ( $v_{i,a}, v_{i,b}$ ) gleich groß und einander entgegengesetzt sind.
4. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Teilversätze ( $v_{i,a}, v_{i,b}$ ) mit der lokalen Meßgenauigkeit der jeweiligen Abtastpunktewolke (5, 6) gewichtet werden.
5. Verfahren nach Anspruch 2 oder 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Teilversätze ( $v_{i,a}, v_{i,b}$ ) mit der lokalen Meßgenauigkeit der jeweiligen Trajektorie (3, 4) gewichtet werden.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass jeweils zumindest zwei Stück erste, zweite, dritte und vierte Orthoprojektionen ( $OP_{i,j}(5_i), OP_{i,j}(6_i), OP_{i+1,j}(5_{i+1}), OP_{i+1,j}(6_{i+1})$ ) in jeweils zueinander orthogonalen Projektionsrichtungen ( $P_j$ ) erstellt werden, um translatorische Versätze ( $v_i$ ) in den drei Raumrichtungen zu erstellen.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass jeweils zumindest zwei Stück erste, zweite, dritte und vierte Orthoprojektionen ( $OP_{i,j}(5_i)$ ,  $OP_{i,j}(6_i)$ ,  $OP_{i+1,j}(5_{i+1})$ ,  $OP_{i+1,j}(6_{i+1})$ ) in jeweils zueinander parallelversetzten Projektionsrichtungen ( $P_j$ ) erstellt werden, um translatorisch-rotative Versätze ( $v_i$ ) zu erstellen.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Raumausschnitte ( $R_i$ ) Quader sind, welche etwa normal zur lokalen Trajektorienrichtung ( $D_{3,4}$ ) liegen, und die ersten und zweiten Projektionsrichtungen ( $P_j$ ) zur lokalen Trajektorienrichtung ( $D_{3,4}$ ) jeweils etwa gleich gerichtet sind.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass der genannte Abstand ( $A$ ) der Raumausschnitte ( $R_i$ ) das 3- bis 20-fache, bevorzugt 5- bis 10-fache ihrer Erstreckung ( $B$ ) in lokaler Trajektorienrichtung ( $D_{3,4}$ ) ist.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die verbesserte Abtastpunktewolke durch Vereinigen der Punktemengen der neupositionierten ersten und der zweiten Abtastpunktewolke ( $5_C$ ,  $6_C$ ) erzeugt wird.

**Hierzu 5 Blatt Zeichnungen**

1/5

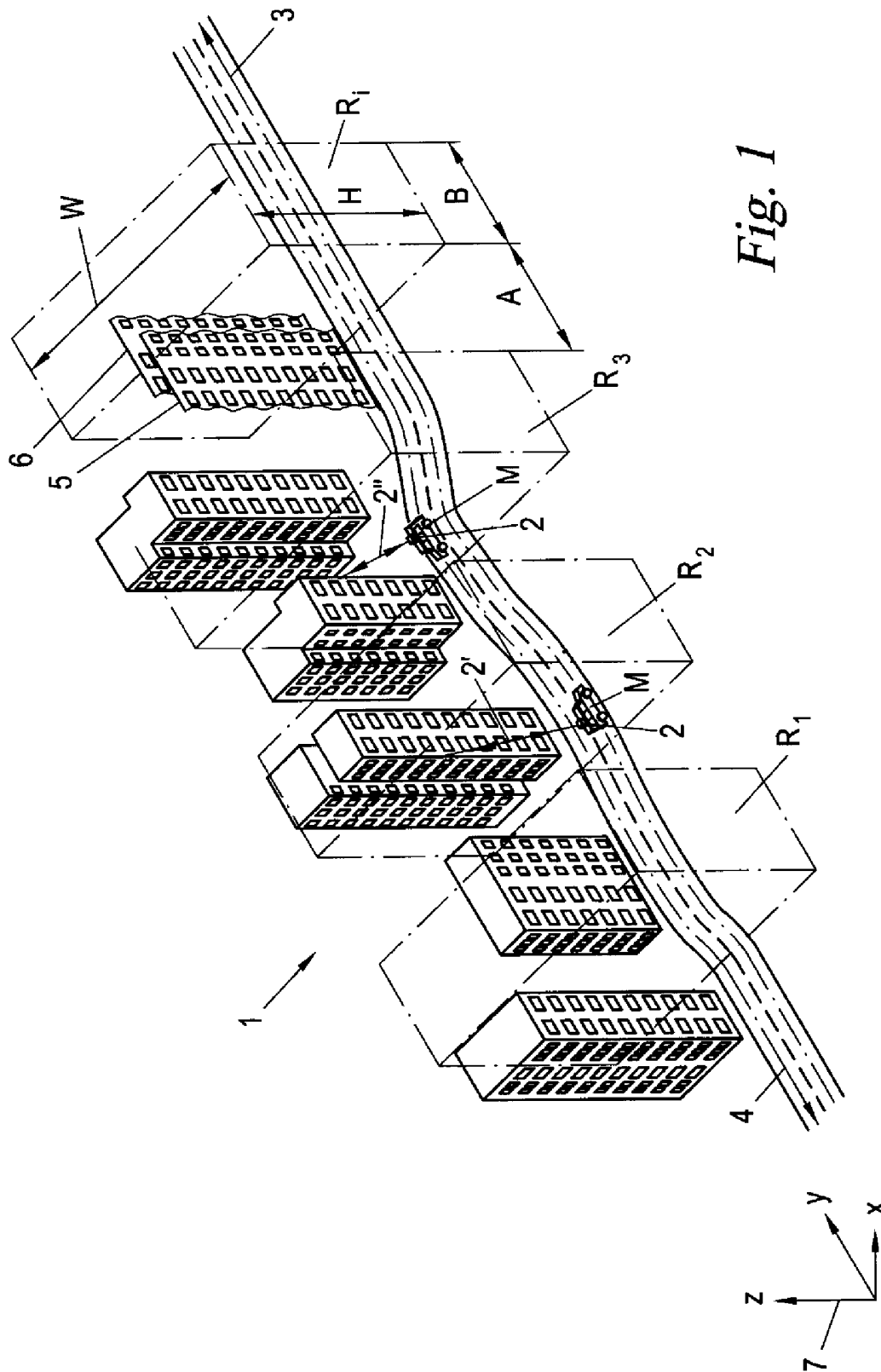


Fig. 1

2/5

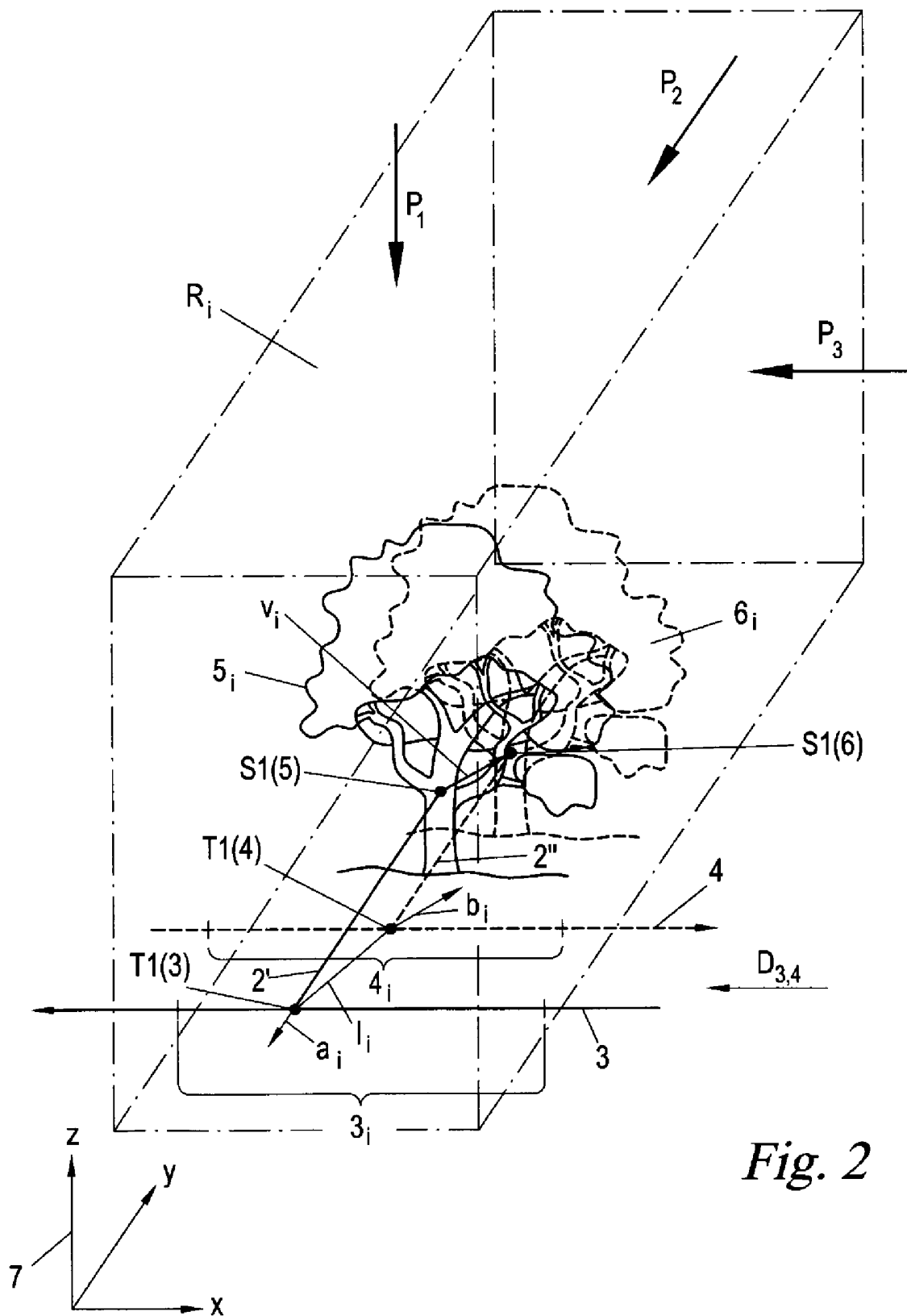
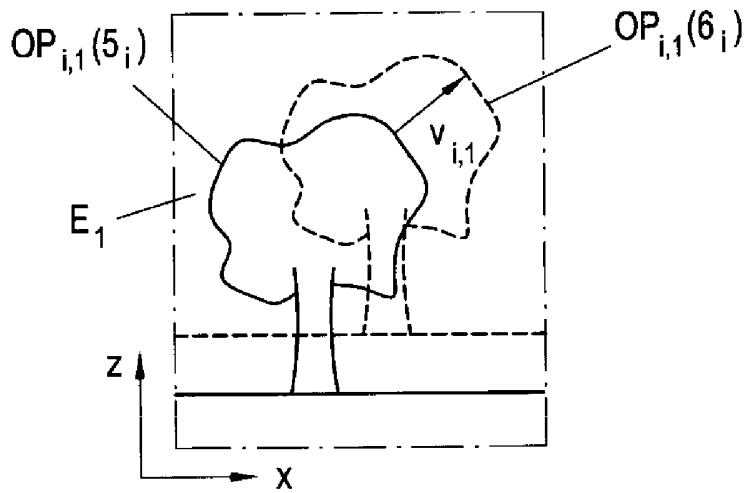
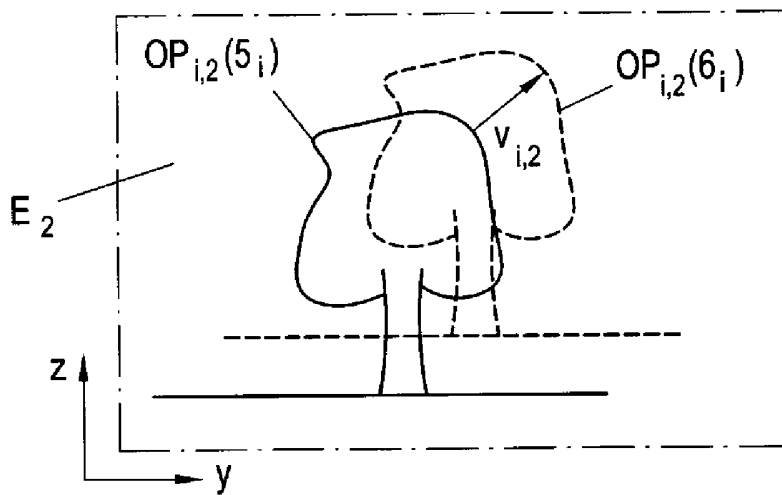


Fig. 2

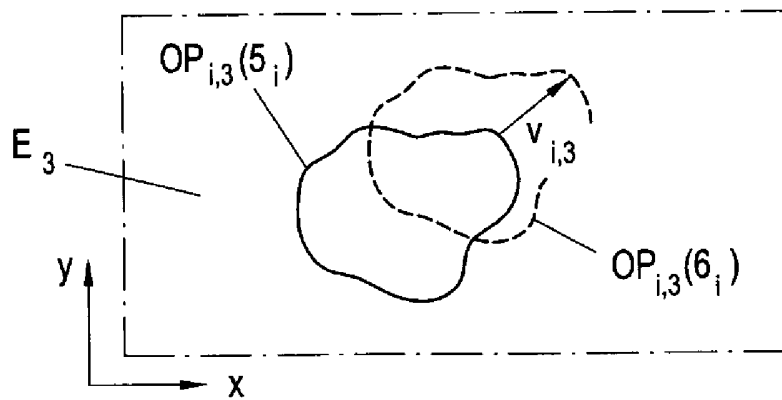
3/5



*Fig. 3a*



*Fig. 3b*



*Fig. 3c*

4/5

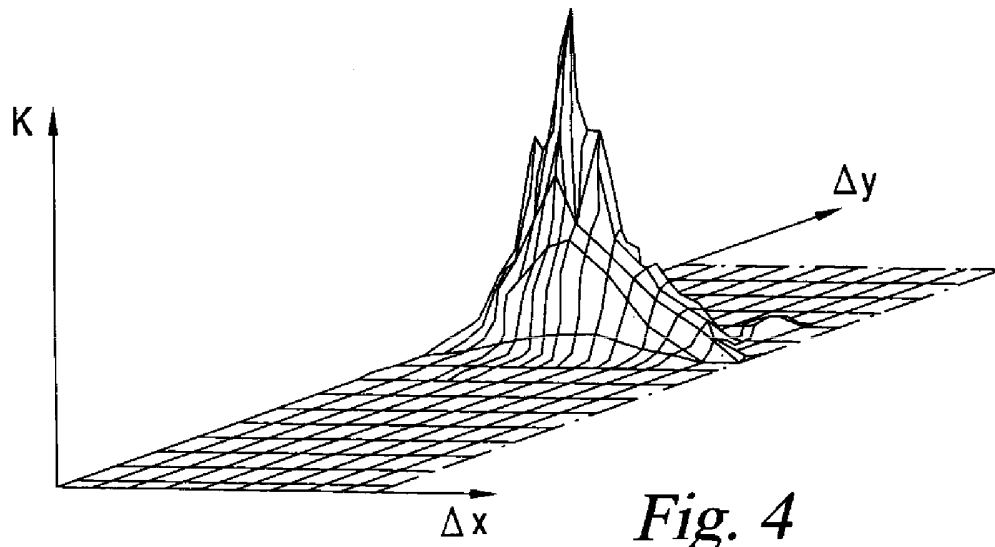


Fig. 4

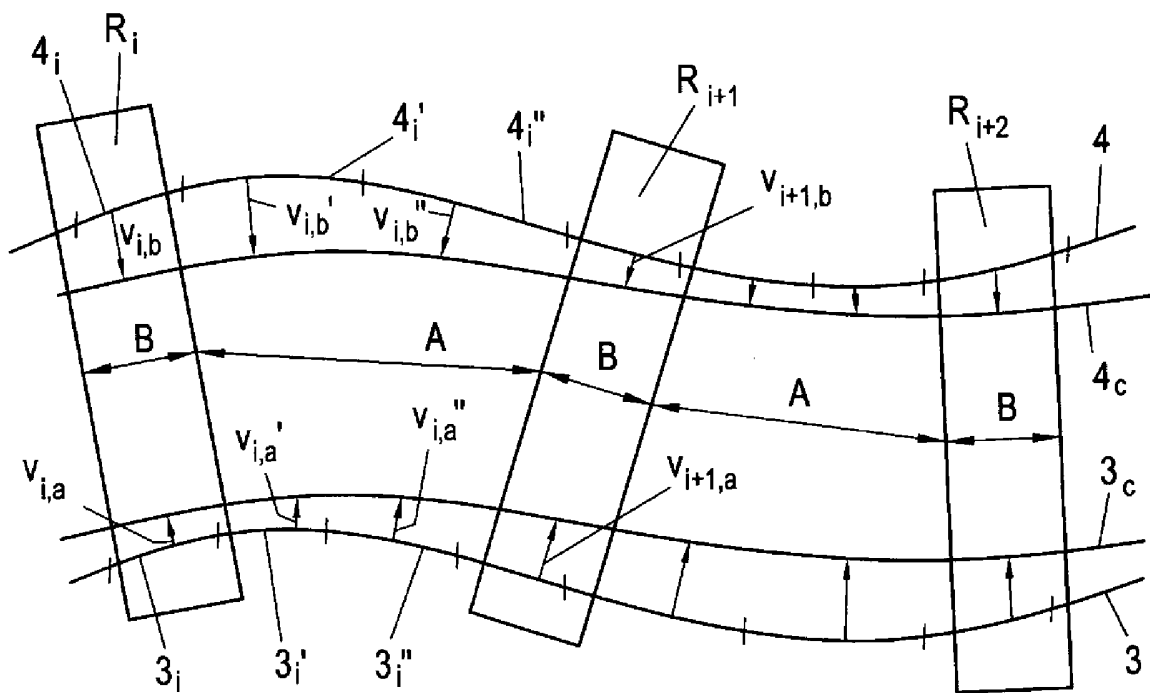


Fig. 6

5/5

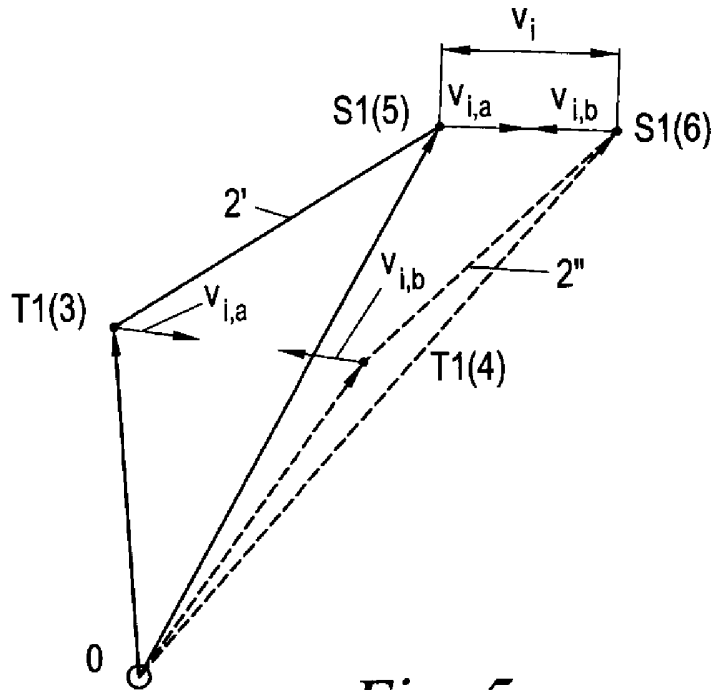


Fig. 5

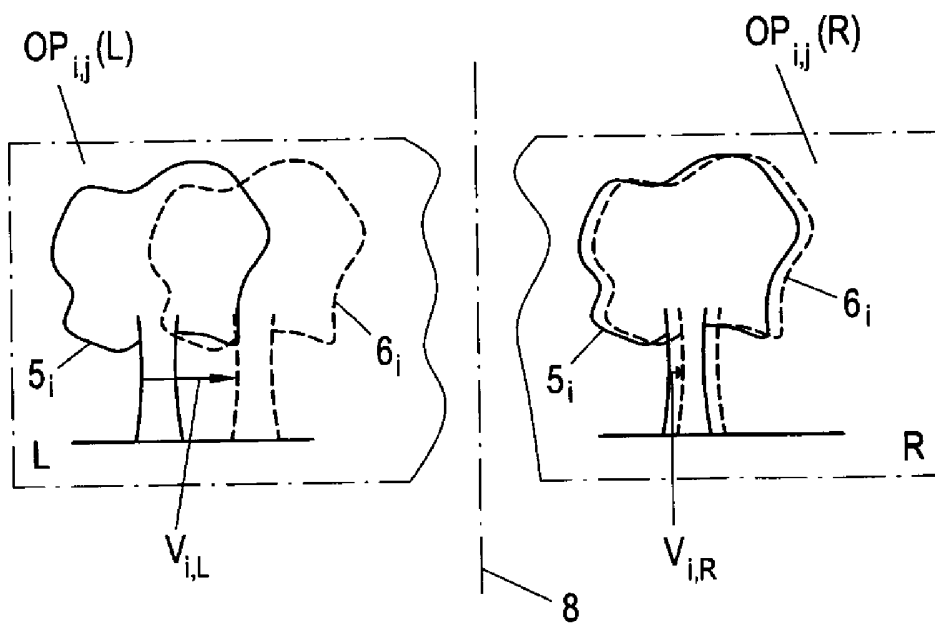


Fig. 7