



(10) **DE 10 2016 205 193 A1** 2017.10.05

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2016 205 193.8**

(22) Anmeldetag: **30.03.2016**

(43) Offenlegungstag: **05.10.2017**

(51) Int Cl.: **G01C 21/28** (2006.01)

G01C 22/00 (2006.01)

B60W 50/00 (2006.01)

(71) Anmelder:
**VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT, 38440
Wolfsburg, DE**

(72) Erfinder:
**Merfels, Christian, 38102 Braunschweig, DE;
Schack, Moritz, Dr., 38106 Braunschweig, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US 8 442 765 B1
US 2014 / 0 249 752 A1

**GRISSETTI, Giorgio; A Tutorial on Graph-Based
SLAM. In IEEE Intelligent Transportation Systems
Magazine, vol. 2, no. 4, winter 2010, S. 31-43**

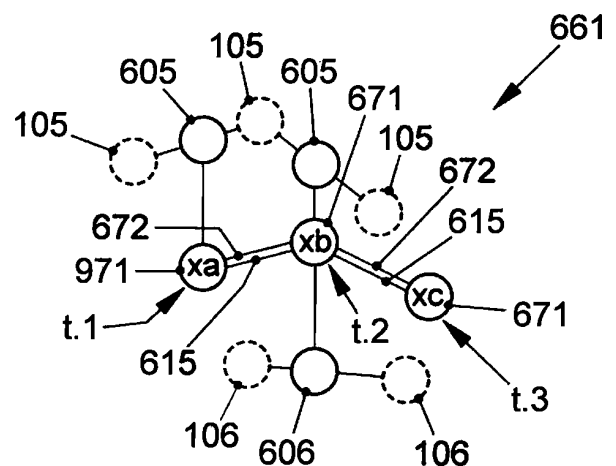
**REHDER, Joern; Global Pose Estimation with
Limited GPS and Long Range Visual Odometry.
In Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE
International Conference on. IEEE, 2012. S. 627-
633**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Marginalisieren eines Posen-Graphen**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Marginalisieren eines Posen-Graphen (661). Um ein besonders flexibles Marginalisieren des Posen-Graphen (661) zu ermöglichen wird vorgeschlagen, nach dem Optimieren des Posen-Graphen (661) einen Knoten (971) des Posen-Graphen (661) auszuwählen und für den ausgewählten Knoten (971) einen Fixknoten des Posen-Graphen (661) zu bestimmen. Der ausgewählte Knoten (971) wird dann aus dem Posen-Graphen (661) entfernt.



Beschreibung

TECHNISCHES GEBIET

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und ein Steuergerät. Insbesondere betreffen verschiedene Ausführungsformen Techniken, um Odometrie-Positionsdaten und Absolut-Positionsdaten einer Maschine beim Erhalten einer geschätzten Position der Maschine zu berücksichtigen. Dabei wird ein Posen-Graph verwendet. Insbesondere betreffen verschiedene Ausführungsformen Techniken, um einen ausgewählten Knoten aus dem Posen-Graphen zu entfernen.

HINTERGRUND

[0002] Es sind Techniken bekannt, um Karten von Gebieten zu erstellen. Z.B. ist aus DE 10 2013 208 521 A1 ein Verfahren zum kollektiven Erlernen und Erstellen eines digitalen Straßenmodells bekannt. Dabei werden Trajektorien- und Perzeptionsdaten für eine Mehrzahl von Trajektorien von einem oder mehreren Fahrzeugen zu erfassen. Ein Informationsgraph wird gebildet, wobei Trajektorienpunkte der Mehrzahl von Trajektorien Knoten des Informationsgraphen bilden und basierend auf Odometriemessungen und Positionsmessungen Kanten zwischen bzw. an den Knoten des Informationsgraphen gebildet werden. Der Informationsgraph wird optimiert. Eine solche Technik weist den Nachteil auf, dass die Modellbildung aufwendig ist und viel Zeit benötigt. Eine Echtzeitanwendung, z.B. um eine Fahrerassistenzfunktionalität zu steuern, ist typischerweise nicht möglich.

[0003] Andererseits sind auch Techniken bekannt, um im Zusammenhang mit einer Fahrerassistenzfunktionalität eine geschätzte Position eines Kraftfahrzeugs zu bestimmen (Positionsbestimmung). Insbesondere sind Techniken der Positionsbestimmung bekannt, welche Absolut-Positionsdaten und Odometrie-Positionsdaten beim Bestimmen der geschätzten Position des Kraftfahrzeugs berücksichtigen. Um die Fahrerassistenzfunktionalität zu gewährleisten, erfolgt dies in Echtzeit.

[0004] Dabei indizieren die Absolut-Positionsdaten die gemessene Position des Kraftfahrzeugs zu einem bestimmten Zeitpunkt in absoluten Werten, beispielsweise in einem UTM oder WGS84 Referenzkoordinatensystem. Optional können die Absolut-Positionsdaten auch mit einer Orientierung versehen sein, welche z.B. eine aktuelle Bewegungsrichtung des Kraftfahrzeugs indizieren. Eine Kombination aus Position und Orientierung wird häufig auch als Pose bezeichnet.

[0005] Die Odometrie-Positionsdaten hingegen indizieren eine Eigenbewegung bzw. Relativbewegung des Kraftfahrzeugs, zum Beispiel in einem willkürlich festgelegten Referenzkoordinatensystem oder im sogenannten Fahrzeugkoordinatensystem (engl. body frame). Dabei wird die Eigenbewegung z.B. jeweils relativ in Bezug auf eine vorangegangene Position des Kraftfahrzeugs indiziert.

[0006] Um verschiedenste Positionsdaten beim Bestimmen der geschätzten Position des Kraftfahrzeugs zu berücksichtigen, sind Techniken der Positionsbestimmung bekannt, die ein oder mehrere Odometrie-Positionsdaten und ein oder mehrere Absolut-Positionsdaten miteinander kombinieren (Sensorfusion). Die verschiedenen Positionsdaten können von unterschiedlichen Positioniersystemen ausgegeben werden. Die Positioniersysteme können unterschiedliche Techniken zur Positionsbestimmung einsetzen, sodass die Positionsdaten der unterschiedlichen Positioniersysteme voneinander unabhängige Schätzungen der Position darstellen können.

[0007] Durch das Berücksichtigen mehrerer voneinander unabhängiger Positionsdaten, die als Ausgabe von verschiedenen Positioniersystemen erhalten werden, kann eine genauere und ausfallsichere Schätzung für die Position des Kraftfahrzeugs bereitgestellt werden. Insbesondere für Anwendungen im Bereich des autonomen Fahrens ist es erforderlich, dass eine möglichst genaue Schätzung der Position des Kraftfahrzeugs mit einer hohen Ausfallsicherheit bereitgestellt werden kann.

[0008] Aus DE 10 2014 211 178 A1 ist ein Verfahren zur Korrektur von Messdaten eines ersten Sensorsystems bekannt. Das erste Sensorsystem und/oder ein zweites Sensorsystem erfassen jeweils unterschiedliche Messdaten, die jeweils direkt und/oder indirekt Navigationsdaten beschreiben. Fehlerwerte werden korrigiert, wenn sie beobachtbar sind, und werden als konstant angenommen, wenn sie nicht beobachtbar sind. Die Fehlerwerte können mittels eines Error-State-Space Kalman-Filters bestimmt werden. Das Verwenden eines Kalman-Filters weist den Nachteil auf, dass lediglich aktuelle Messdaten berücksichtigt werden können. Ins-

besondere kann es nicht oder nur eingeschränkt möglich sein, weiter zurückliegende Messdaten zu berücksichtigen. Deshalb sind entsprechende Techniken oftmals vergleichsweise ungenau.

[0009] Aus der deutschen Patentanmeldung DE 10 2015 219 577 sind Techniken bekannt, um Sensorfusion basierend auf einen Posen-Graphen durchzuführen. Dabei wird der Posen-Graph wiederholt optimiert.

[0010] Solche Techniken weisen den Nachteil auf, dass mit zunehmender Laufzeit der Posen-Graph immer größer wird und damit die Optimierung rechenintensiver wird.

[0011] Es sind Techniken zur Marginalisierung eines Posen-Graphen unter Verwendung eines Schur-Komplements bekannt, siehe z.B. Sibley G. et al., J. Field Robotics 27 (2010) 587–608. Solche Techniken weisen den Nachteil auf, dass eine Anpassung des Schur-Komplements nicht oder nur eingeschränkt möglich ist.

ZUSAMMENFASSUNG

[0012] Deshalb besteht ein Bedarf für verbesserte Techniken zur Marginalisierung eines Posen-Graphen. Insbesondere besteht ein Bedarf für flexible Techniken zur Marginalisierung eines Posen-Graphen.

[0013] Diese Aufgabe wird von den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Die abhängigen Patentansprüche definieren Ausführungsformen.

[0014] Gemäß einem Aspekt betrifft die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Marginalisierung eines Posen-Graphen, welches für jeden von mehreren Zeitpunkten umfasst: jeweils Ermitteln von Odometrie-Positionsdaten einer Maschine basierend auf einer Ausgabe mindestens eines Odometrie-Positioniersystems. Das Verfahren umfasst weiterhin für jeden der mehreren Zeitpunkte: jeweils Ermitteln von Absolut-Positionsdaten der Maschine basierend auf einer Ausgabe mindestens eines Absolut-Positioniersystems. Das Verfahren umfasst weiterhin das Erzeugen eines Posen-Graphen. Kanten des Posen-Graphen entsprechen den Odometrie-Positionsdaten. Knoten des Posen-Graphen entsprechen den Absolut-Positionsdaten. Das Verfahren umfasst weiterhin das Optimieren des Posen-Graph zum Erhalten einer geschätzten Position der Maschine. Das Verfahren umfasst weiterhin das Auswählen eines Knotens des Posen-Graphen nach dem Optimieren. Das Verfahren umfasst weiterhin, für den ausgewählten Knoten: Bestimmen eines Fixknotens des Posen-Graphen. Das Verfahren umfasst weiterhin das Entfernen des ausgewählten Knotens aus dem Posen-Graph.

[0015] Zum Beispiel kann der Posen-Graph vorzugsweise einen Knoten für jeden der mehreren Zeitpunkte aufweisen. Die mehreren Zeitpunkte können also ein Zeitfenster von der IST-Zeit bis in die Vergangenheit abdecken (engl. sliding window). Entsprechend können beim Erzeugen des Posen-Graphen Ausgaben des mindestens einen Odometrie-Positioniersystems und des mindestens einen Absolut-Positioniersystems berücksichtigt werden, die einen aktuellen Zustand der Maschine, sowie Zustände in der näheren Vergangenheit indizieren. Z.B. kann beim Erzeugen des Posen-Graph vorzugsweise eine fest vorgegebene Anzahl von Zeitpunkten berücksichtigt werden. Die Verwendung des Posen-Graphen kann eine Alternative zur Verwendung der vorbekannten Kalman-Filter zur Sensorfusion darstellen.

[0016] Grundlagen zum Posen-Graph und eine entsprechende Optimierung sind beispielsweise aus Kümmerle, R. et al., g2o2o: A General Framework for Graph Optimization, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011 bekannt. Dort ist auch der Aufbau einer entsprechenden Systemmatrix beschrieben. Der Posen-Graph umfasst Knoten, welche zu optimierenden Zustandsvariablen (hier: Absolut-Positionen der Maschine zu einem bestimmten Zeitpunkt) entsprechen, und Kanten, welche einer paarweise Verknüpfung der Zustände der durch die jeweilige Kante verbundenen Knoten entsprechen. Es ist zum Beispiel vorteilhafter möglich, dass die Knoten des Posen-Graphen mit einer Richtung (engl. heading) assoziiert sind; insoweit können die Knoten Posen darstellen. Der Posen-Graph gemäß den verschiedenen hierin offenbarten Szenarien umfasst die Ausgaben des mindestens einen Odometrie-Positioniersystems und des mindestens einen Absolut-Positioniersystems.

[0017] Z.B. können in vorteilhaften Ausführungsformen die Schätzungen für die Position der Maschine, wie sie von dem mindestens einen Absolut-Positioniersystem bereitgestellt werden, im Zusammenhang mit Knoten des Posen-Graph berücksichtigt werden. Z.B. können die verschiedenen Knoten des Posen-Graphen über Randbedingungen mit den verschiedenen Absolut-Positionsdaten des mindestens einen Absolut-Positioniersystems verknüpft sein – manchmal werden auch solche Verknüpfungen in Form von Randbedingungen als Kanten des Posen-Graphen bezeichnet; diese Terminologie wird hierin aber zur Vermeidung von Doppeldeutigen nicht übernommen. Dabei können z.B. vorteilhafterweise die Absolut-Positionsdaten formal als Fixknoten

berücksichtigt werden, die durch die Optimierung nicht beeinflusst werden, und die zu optimierenden Knoten des Posen-Graphen können als Optimierungsknoten bezeichnet werden. Ein Optimierungsknoten kann mit mehreren Fixknoten, deren Position nicht durch die Optimierung verändert wird, über Randbedingungen verknüpft sein.

[0018] Z.B. können die Eigenbewegungsschätzungen, wie sie als die Ausgabe des mindestens einen Odometrie-Positioniersystems in Form der Odometrie-Positionsdaten bereitgestellt werden, vorteilhafterweise im Zusammenhang mit den Kanten des Posen-Graphen berücksichtigt werden. Wiederum können vorteilhafterweise Optimierungskanten und Fixkanten berücksichtigt werden, die in Form von Randbedingungen verknüpft sind. Die Optimierungskanten können vorzugsweise durch zwei benachbarte Optimierungsknoten vorgegeben sein. Zum Beispiel sind Szenarien denkbar, bei denen mehr als ein Odometrie-Positioniersystem Ausgaben bereitstellt; in einem solchen Szenario ist es möglich, dass mehr als eine Kante zwischen zwei benachbarten Knoten des Posen-Graphen vorhanden ist.

[0019] Da die unterschiedlichen Odometrie-Positionsdaten und Absolut-Positionsdaten Abweichungen voneinander aufweisen können, kann es mittels des Optimierens des Posen-Graph möglich sein, die geschätzte Position als besten Kompromiss zwischen den verschiedenen Absolut-Positionsdaten und Odometrie-Positionsdaten zu erhalten. Im Rahmen des Optimierens des Posen-Graphen können die Knoten und Kanten verschoben werden, d.h. gegenüber den aus den Ausgaben der Positioniersysteme erhaltenen Werten verändert werden. Die zu optimierenden Knoten werden häufig als Optimierungsknoten bezeichnet. Die Optimierungsknoten sind durch Randbedingungen mit den aus den Ausgaben der Positioniersysteme erhaltenen Knoten und Kanten verknüpft.

[0020] Es ist möglich, dass die Absolut-Positionsdaten und/oder die Odometrie-Positionsdaten mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind. Eine solche Unsicherheit kann auch als Varianz bezeichnet werden. Zum Beispiel kann die Varianz der Odometrie-Positionsdaten und/oder der Absolut-Positionsdaten beim Optimieren des Posen-Graph berücksichtigt werden.

[0021] Im Zusammenhang mit dem Posen-Graph werden oftmals Fehlerterme definiert, welche umso größer (kleiner) sind, umso weiter (weniger weit) sich die durch das Optimieren geschätzte Positionen von den Ausgaben der Positioniersysteme entfernen und je kleiner (größer) die Varianz der entsprechenden Ausgaben der Positioniersysteme ist. Das Optimieren kann vorzugsweise eine Konfiguration des Posen-Graphen bereitstellen, welche einem extremalen Wert der Fehlerterme entspricht. Vorzugsweise wird ein globaler extremaler Wert der Fehlerterme angestrebt. Das Optimieren kann in vorteilhafter Weise numerisch erfolgen. Das Optimieren kann in vorteilhafter Weise iterativ erfolgen, d.h. mehrere Optimierungsiterationen umfassen. Zum Beispiel kann das Optimieren vorteilhafterweise eine Technik nichtlinearer minimaler Quadrate (engl. nonlinear least-squares) umfassen. Zum Beispiel kann das Optimieren vorteilhafterweise mittels einer Gauß-Newton-Technik erfolgen und / oder mittels einer Levenberg-Marquardt-Technik erfolgen.

[0022] Solche Techniken ermöglichen eine Echtzeitanwendung. Z.B. kann die Maschine ein Kraftfahrzeug sein. Vorzugsweise umfasst weiterhin das Steuern einer Fahrerassistenzfunktionalität basierend auf der geschätzten Position des Kraftfahrzeugs. Z.B. kann die Fahrerassistenzfunktionalität vorzugsweise autonomes Fahren des Kraftfahrzeugs betreffen. Es wäre auch möglich, dass die Fahrerassistenzfunktionalität vorteilhafterweise teilautomatisches oder hochautomatisches Fahren betrifft. Es wäre auch möglich, dass die Fahrerassistenzfunktionalität vorteilhafterweise einen Stauassistenten betrifft. Es ist zum Beispiel vorzugsweise möglich, dass die Fahrerassistenzfunktionalität die Position des Kraftfahrzeugs beeinflusst. Insoweit kann basierend auf der geschätzten Position die Position des Kraftfahrzeugs beeinflusst werden. Z.B. kann die Fahrerassistenzfunktionalität einen elektrischen Lenkstrang des Kraftfahrzeugs steuern. Z.B. kann die Fahrerassistenzfunktionalität vorzugsweise die Bremsen und den Motor des Kraftfahrzeugs steuern. Z.B. kann die Fahrerassistenzfunktionalität umfassen: einen Spurhalteassistenten; einen Abstandsassistenten; einen Einparkassistenten; etc.

[0023] Durch das Verwenden des Posen-Graphen ist es möglich, vorzugsweise eine unterschiedliche Anzahl von Odometrie-Positionsdaten und/oder eine unterschiedliche Anzahl von Absolut-Positionsdaten zu berücksichtigen. Insbesondere ist es möglich, dass die Anzahl der Odometrie-Positionsdaten und/oder die Anzahl der Absolut-Positionsdaten, die beim Erzeugen des Posen-Graph berücksichtigt wird, als Funktion der Zeit variiert. Durch die generische Verwendung der Odometrie-Positionsdaten und der Absolut-Positionsdaten können die zu fusionierenden Ausgaben verschiedener Positioniersysteme modular ausgewechselt werden. Derart kann es vorteilhafterweise möglich sein, immer sämtliche verfügbaren Ausgaben von Positioniersysteme zu berücksichtigen. Derart kann es vorzugsweise möglich sein, auch in Übergangssituationen, bei denen Ausgaben von

bestimmten Positioniersysteme gerade nicht mehr oder nur noch eingeschränkt verfügbar sind, jedoch Ausgaben von weiteren Positioniersystemen verfügbar werden, die geschätzte Position der Maschine mit einer besonders hohen Zuverlässigkeit zu erhalten.

[0024] Darüber hinaus erlaubt die Verwendung des Posen-Graphen im Vergleich zu Referenzimplementierungen basierend auf Kalman-Filtern eine genauere Schätzung der Position der Maschine nicht nur für die IST-Zeit, sondern auch für die Vergangenheit.

[0025] In verschiedenen vorteilhaften Szenarien kann das Optimieren des Posen-Graphen weiterhin eine Zuverlässigkeit der geschätzten Position der Maschine bereitstellen. Es ist möglich, dass die Fahrerassistenzfunktionalität der Maschine weiterhin basierend auf der Zuverlässigkeit der geschätzten Position gesteuert wird.

[0026] Die Zuverlässigkeit kann z.B. vorzugsweise die Summe der Fehlerterme für die verschiedenen Knoten des optimierten Posen-Graphen berücksichtigen. Aktuellere (ältere) Knoten können einen größeren (geringeren) Einfluss auf die Zuverlässigkeit der geschätzten Position aufweisen. Zum Beispiel kann in einem Szenario, bei dem die durch das Optimieren erhaltene Zuverlässigkeit der geschätzten Position vergleichsweise groß wird, ein manueller Fahrereingriff von der Fahrerassistenzfunktionalität gefordert werden.

[0027] Durch das Berücksichtigen der Zuverlässigkeit der geschätzten Position kann die Fahrerassistenzfunktionalität mit einer großen Sicherheit gesteuert werden; insbesondere kann vermieden werden, dass die Fahrerassistenzfunktionalität auf Grundlage von nicht oder nur eingeschränkt belastbaren Schätzungen für die Position des Kraftfahrzeugs gesteuert wird.

[0028] In verschiedenen vorteilhaften Szenarien kann das Optimieren des Posen-Graphen weiterhin eine geschätzte Odometrie der Maschine bereitstellen. Es ist möglich, dass die Fahrerassistenzfunktionalität des Kraftfahrzeugs weiterhin basierend auf der geschätzten Odometrie gesteuert wird.

[0029] Die Odometrie kann z.B. vorteilhafterweise eine aktuelle Orientierung / Fahrrichtung der Maschine indizieren. Zusammen mit der geschätzten Position des Kraftfahrzeugs kann so eine geschätzte Position und Orientierung (Pose) des Kraftfahrzeugs bereitgestellt werden.

[0030] Zum Beispiel kann vorteilhafterweise durch das Optimieren des Posen-Graphen die geschätzte Position der Maschine zu einem in Bezug auf die mehreren Zeitpunkte zukünftigen Zeitpunkt erhalten werden.

[0031] In anderen Worten kann es in verschiedenen vorteilhaften Ausführungsformen möglich sein, dass die Position für einen zukünftigen Zeitpunkt abgeschätzt wird. Es kann also eine Vorhersage für die Position der Maschine getroffen werden.

[0032] Das Erzeugen und Optimieren des Posen-Graph benötigt eine gewisse Zeitdauer (Optimierungszeitdauer). Die Optimierungszeitdauer kann durch das Bereitstellen der geschätzten Position für den zukünftigen Zeitpunkt kompensiert werden.

[0033] Dadurch kann es möglich sein, die Fahrerassistenzfunktionalität besonders zielgerichtet zu steuern. Insbesondere kann es möglich sein, mit einer besonders geringen Latenzzeit eine Information über die aktuelle Position der Maschine bereitzustellen. Echtzeitanwendungen sind möglich.

[0034] Die Optimierungszeitdauer kann durch Begrenzen der Anzahl von Knoten des Posen-Graphen reduziert werden. Durch das Entfernen des ausgewählten Knoten aus dem Posen-Graph kann die Anzahl der Knoten des Posen-Graphen reduziert werden. Indem jedoch gleichzeitig der Fixknoten für den Posen-Graph bestimmt wird, kann ein nachfolgendes Optimieren des Posen-Graphen trotzdem eine hohe Genauigkeit aufweisen.

[0035] Zum Beispiel könnte das Verfahren also weiterhin, nach dem Entfernen des ausgewählten Knotens umfassen: erneutes Optimieren des Posen-Graphen zum Erhalten einer weiteren geschätzten Position der Maschine. Die Position des Fixknotens kann gegenüber dem erneuten Optimieren unveränderlich sein. Der Fixknoten kann über eine Kante mit einem benachbarten Knoten des Posen-Graphen verbunden sein. Indem die Position des Fixknotens gegenüber dem erneuten Optimieren unveränderlich bzw. fix ist, kann die Komplexität des erneuten Optimierens vergleichsweise begrenzt sein. Dadurch kann die Optimierungszeitdauer reduziert werden.

[0036] Solchen Techniken liegt die Erkenntnis zugrunde, dass es aufgrund von Restriktionen in der Komplexität der Optimierung des Posen-Graphen oftmals erforderlich sein kann, die Anzahl von Knoten und Kanten des Posen-Graphen zu reduzieren. Dies kann durch Entfernen bzw. Löschen einzelner Knoten und Kanten des Posen-Graphen erfolgen. Zum Beispiel können die ältesten Knoten und Kanten des Posen-Graphen gelöscht werden, d.h. es kann derjenige Knoten des Posen-Graphen ausgewählt werden, der dem ältesten Zeitpunkt entspricht. Ein solches Löschen von alten Knoten und Kanten bewirkt herkömmlicherweise, dass alte Positionsdaten keinen Einfluss mehr auf die aktuelle Schätzung der Position aufweisen. Dies führt dazu, dass die Schätzungen eine begrenzte Genauigkeit aufweisen. Zum Beispiel können die Schätzungen für die Position eine vergleichsweise hohe Ungenauigkeit aufweisen.

[0037] Deshalb sind in vorbekannten Techniken Ansätze zur sogenannten Marginalisierung bekannt. Vorbekannte Ansätze zur Marginalisierung umfassen das Bilden des Schur-Komplements auf die Systemmatrix. Solche Techniken haben keine modellhafte Entsprechung im Posen-Graph. Solche Techniken resultieren häufig in einer dichter besetzten Systemmatrix; dadurch kann wiederum der Rechenaufwand zum Durchführen der Optimierung erhöht werden, wodurch wiederum die Optimierungszeitdauer vergleichsweise lang sein kann.

[0038] Die hierin beschriebenen Techniken ermöglichen es, durch Vorsehen des Fixknotens anstelle des ausgewählten Knotens, beispielsweise desjenigen Knotens, der dem ältesten Zeitpunkt entspricht, einerseits eine dichtere Besetzung der Systemmatrix – und damit eine verlängerte Optimierungszeitdauer – zu vermeiden und gleichzeitig die Genauigkeit bei der Abschätzung der Position durch Optimieren des Posen-Graphen nicht oder nicht signifikant herabzusetzen. Die hierin beschriebenen Techniken ermöglichen daher eine besonders genaue Marginalisierung des Posen-Graphen im Vergleich zu vorbekannten Techniken. Mittels der hier beschriebenen Techniken kann es also möglich sein, dass auch nach mehreren Marginalisierungen des Posen-Graphen das Optimierungsproblem handhabbar bleibt und nicht als Funktion der Zeit degeneriert.

[0039] Es können unterschiedliche Techniken zum Bestimmen des Fixknotens eingesetzt werden. Zum Beispiel kann der Fixknoten basierend auf Elementen bestimmt werden, die aus folgender Gruppe ausgewählt sind: die Position des ausgewählten Knotens; mindestens eine Kante, die mit dem ausgewählten Knoten verbunden ist; Absolut-Positionsdaten, die dem ausgewählten Knoten entsprechen; und ein weiterer Fixknoten, der über eine Kante mit dem ausgewählten Knoten verbunden ist. Zum Beispiel können die Absolut-Positionsdaten über einen Fixknoten repräsentiert werden. Solche Fixknoten, die über eine Kante als Randbedingung mit dem ausgewählten Knoten verbunden sind, können beim Bestimmen des Fixknotens berücksichtigt werden; andere Absolut-Positionsdaten können unberücksichtigt bleiben. Zum Beispiel kann der weitere Fixknoten im Rahmen einer vorangegangenen Marginalisierung bestimmt worden sein. Zum Beispiel können alle weiteren vorhandenen entsprechenden weiteren Fixknoten berücksichtigt werden. Derart kann es zum Beispiel möglich sein, dass der Fixknoten Informationen in Bezug auf den ausgewählten und entfernten Knoten in sich bündelt. Vergangene Information wird dann durch das Entfernen des ausgewählten Knotens nicht einfach verworfen, sondern auf den Fixknoten übertragen. Deshalb könnte der Fixknoten auch als Prior-Fixknoten bezeichnet werden.

[0040] Da ein solcher Fixknoten im Graphen direkt dargestellt werden kann, ist eine semantische Interpretation einfach möglich – im Gegensatz zur herkömmlichen Marginalisierung auf Grundlage des Schur-Komplements. Eine solche semantische Interpretation könnte zum Beispiel lauten: „die gebündelten Positionsinformationen, die bisher aus dem Posen-Graphen entfernt wurden, führen zu der Schätzung, dass die Maschine sich an der Position des Fixknoten befunden hat“. Vorteilhafterweise wäre es also möglich, dass der Fixknoten das Schur-Komplement des ausgewählten Knotens darstellt. Damit kann erreicht werden, dass der Fixknoten eine Reduktion der Genauigkeit der Optimierung durch Entfernen des ausgewählten Knotens vermeidet. In anderen Ausführungsformen sind aber auch andere Techniken zum Bestimmen des Fixknotens möglich.

[0041] Der Posen-Graph, der den Fixknoten aufweist, nicht jedoch den ausgewählten Knoten, kann weiterhin das vollständige bzw. ursprüngliche Optimierungsproblem repräsentieren. Jedoch ist es entbehrlich, die Matrix-Darstellung des Posen-Graphen zum vollständigen Verständnis zu berücksichtigen. Dies verbessert das Potenzial zum Problemverständnis des Entwicklers/Nutzers, Analysemöglichkeiten und Manipulationsmöglichkeiten zur Lösung des Problems.

[0042] Als weiterer Effekt ermöglicht es der Fixknoten, die Unsicherheit der alten Informationen anzupassen und die Gewichtung zu beeinflussen, falls dies erforderlich ist. Zum Beispiel könnte das Verfahren weiterhin umfassen, vor dem Durchführen einer erneuten Optimierung: Anpassen einer Verlustfunktion der Kante des Posen-Graphen, die zwischen dem Fixknoten und dem benachbarten Knoten verläuft, und/oder Anpassen einer Unsicherheit des Fixknotens. Besonders unplausible Information, die in dem Fixknoten abgebildet ist, kann

dann mit einer größeren Unsicherheit berücksichtigt werden, was eine Toleranz bei der Optimierung erhöhen kann. Es ist auch möglich eine robuste Kosten- oder Verlustfunktion auf den Fehlerterm der Randbedingung, die durch den Fixknoten repräsentiert wird, anzuwenden.

[0043] Zum Beispiel wäre es möglich, dass das Entfernen des ausgewählten Knotens selektiv in Abhängigkeit einer Anzahl von Knoten des Posen-Graphen durchgeführt wird. Überschreitet zum Beispiel die Anzahl der Knoten des Posen-Graphen einen vorgegebenen Schwellenwert, so kann jeweils der älteste Knoten aus dem Posen-Graphen ausgewählt und entfernt werden, wobei gleichzeitig der entsprechende Fixknoten bestimmt wird. Dadurch kann einerseits erreicht werden, dass die Optimierungszeitdauer durch eine besonders große Anzahl von Knoten nicht unverhältnismäßig lange wird; gleichzeitig kann jedoch eine unnötig häufige Marginalisierung des Posen-Graphen vermieden werden.

[0044] Gemäß verschiedener vorteilhafter Beispiele ist es möglich, dass die mehreren Zeitpunkte basierend auf einer vorgegebenen Taktrate bestimmt werden. Dann ist es vorzugsweise möglich, dass jeweils mit zugehörigen Abtastraten Roh-Odometrie-Positionsdaten als die Ausgabe des mindestens einen Odometrie-Positioniersystems empfangen werden. Entsprechend ist es vorzugsweise möglich, dass jeweils mit zugehörigen Abtastraten Roh-Absolut-Positionsdaten als die Ausgabe des mindestens einen Absolut-Positioniersystems empfangen werden. Dabei kann die vorgegebene Taktrate verschieden von den Abtastraten sein. Die Abtastraten können als Funktion der Zeit variieren.

[0045] Zum Beispiel wäre es möglich, dass das Verfahren weiterhin umfasst: Interpolieren der Roh-Absolut-Positionsdaten basierend auf der vorgegebenen Taktrate und basierend auf der jeweiligen Abtastrate zum Ermitteln der Absolut-Positionsdaten für jeden der mehreren Zeitpunkte. Zum Beispiel wäre es vorzugsweise möglich, dass das Verfahren weiterhin umfasst: Interpolieren der Roh-Odometrie-Positionsdaten basierend auf der vorgegebenen Taktrate und basierend auf der Abtastrate zum Ermitteln der Odometrie-Positionsdaten für die verschiedenen Zeitpunkte. Das Interpolieren kann also vorzugsweise im Orts-Zeitraum erfolgen. Z.B. kann das Interpolieren in einem Referenzkoordinatensystem des Posen-Graphen erfolgen.

[0046] In verschiedenen vorteilhaften Varianten ist es möglich, dass eine Koordinatentransformation der Roh-Absolut-Positionsdaten und/oder der Roh-Odometrie-Positionsdaten durchgeführt wird, um jeweils die Absolut-Positionsdaten und/oder die Odometrie-Positionsdaten zu erhalten. Zum Beispiel könnte eine Koordinatentransformation zwischen einem UTM-Koordinatensystem und einem WGS84-Koordinatensystem durchgeführt werden. Es wäre vorteilhafterweise auch möglich, dass die Koordinatentransformation eine Koordinatenrotation umfasst. Zum Beispiel könnte eine Rotation zwischen einem proprietären Referenzsystem, beispielsweise Geschwindigkeit und Gierrate des Kraftfahrzeugs als Maschine, und dem Referenzsystem des Posen-Graphen stattfinden. Zum Beispiel kann vorzugsweise ein Modell des Kraftfahrzeugs berücksichtigt werden, um Fahrzeug-spezifische Eigenschaften bei der Koordinatentransformation zu berücksichtigen.

[0047] Mittels solcher Techniken ist es möglich, dass unterschiedliche Zeitverhalten der verschiedenen Positioniersysteme flexibel berücksichtigt werden. Insbesondere ist es nicht notwendig, dass die verschiedenen Positioniersysteme die Ausgaben mit einer fest vorgegebenen oder statischen Abtastrate bereitstellen. Es muss keine a-priori Annahme über das Zeitverhalten der bei dem Erzeugen des Posen-Graph berücksichtigten Positionsdaten getroffen werden.

[0048] Zum Beispiel wäre es vorteilhafterweise möglich, dass die Roh-Odometrie-Positionsdaten und/oder die Roh-Absolut-Positionsdaten jeweils mit einem Zeitstempel versehen sind. Zum Beispiel könnte vorteilhafterweise der Zeitstempel einen Zeitpunkt indizieren, zu welchem das jeweilige Positioniersystem die Odometrie-Positionsdaten und/oder die Roh-Absolut-Positionsdaten gemessen hat.

[0049] Zum Beispiel kann es vorteilhafterweise möglich sein, dass Positionsdaten unterschiedlicher Positioniersysteme nicht in einer zeitsequenziellen Abfolge bereitgestellt werden, sondern in einer Reihenfolge, die gegenüber den entsprechenden Zeitstempeln vertauscht ist. Dies kann der Fall sein, da unterschiedliche Positioniersysteme unterschiedliche Abtastraten und / oder unterschiedliche Latenzzeiten aufweisen können. Zum Beispiel können die Odometrie-Positionsdaten und die Absolut-Positionsdaten für die mehreren Zeitpunkte in einem Speicher zwischengespeichert werden.

[0050] Beim Erzeugen des Posen-Graphen können solche nicht zeitsequenziell empfangenen Roh-Positionsdaten in der Vergangenheit einfach eingefügt werden. Dies erhöht die Flexibilität beim Fusionieren der Ausgaben unterschiedlichster Positioniersysteme. Eine Echtzeit-Erzeugung und Optimierung des Posen-Graphen

kann entbehrlich sein, da eine Vorhersage für die geschätzte Position zu dem zukünftigen Zeitpunkt getroffen werden kann.

[0051] Es ist zum Beispiel vorzugsweise möglich, dass jeweils eine Iteration des Erzeugens und Optimierens des Posen-Graphen für jeden Takt einer vorgegebenen Optimierungstaktrate durchgeführt wird. Für jede Iteration kann vorteilhafterweise die entsprechende geschätzte Position der Maschine erhalten werden.

[0052] Es ist möglich, dass die Optimierungstaktrate verschieden von der Taktrate, welche die mehreren Zeitpunkte bestimmt, gewählt wird. Es wäre aber auch möglich, dass die Optimierungstaktrate gleich der Taktrate zum Bestimmen der mehreren Zeitpunkte gewählt wird. In beiden Szenarien kann es möglich sein, dass der Posen-Graph iterativ erzeugt wird, d.h. dass für verschiedene Iterationen des Erzeugens und Optimierens des Posen-Graphen auf vorangegangenen erzeugte Posen-Graphen zurückgegriffen werden kann.

[0053] Zum Beispiel kann die Optimierungstaktrate im Bereich zwischen 0,1 Hz und 100 Hz liegen, bevorzugt im Bereich zwischen 1 Hz und 50 Hz. In verschiedenen Szenarien kann es erstrebenswert sein, die Optimierungstaktrate möglichst konstant zu halten. Dies kann es ermöglichen, dass nachgeschaltete Logik wie insbesondere die Fahrerassistenzfunktionalität besonders zuverlässig betrieben bzw. gesteuert werden kann.

[0054] Durch das Verwenden des Posen-Graphen kann ein besonders effizientes Optimieren zum Erhalten der geschätzten Position der Maschine implementiert werden. Deshalb können vergleichsweise hohe Optimierungstakraten gewählt werden. Dadurch kann die geschätzte Position besonders zügig bestimmt werden.

[0055] Es ist zum Beispiel vorzugsweise möglich, dass die Zeitdauer, die zumindest für das Optimieren des Posen-Graphen in den verschiedenen Iterationen benötigt wird, überwacht wird. Dann ist es vorzugsweise möglich, dass die vorgegebene Taktrate und/oder die Anzahl der Zeitpunkte und / oder eine Genauigkeit des Optimierens in Abhängigkeit des Überwachens der Zeitdauer bestimmt wird.

[0056] Zum Beispiel kann vorteilhafterweise die Genauigkeit des Optimierens einer Anzahl der Optimierungssiterationen entsprechen. Zum Beispiel kann eine höhere (geringere) Genauigkeit einer größeren Anzahl (geringeren Anzahl) von Optimierungssiterationen entsprechen.

[0057] Das Überwachen kann vorzugsweise das wiederholte Messen der Optimierungszeitdauer umfassen. Zum Beispiel kann vorzugsweise die gesamte Zeitdauer überwacht werden, die zum Erzeugen und Optimieren des Posen-Graph benötigt wird. Zum Beispiel wäre es möglich, kleinere (größere) Taktraten und / oder eine kleinere (größere) Anzahl von Zeitpunkten und/oder eine geringere (größere) Genauigkeit des Optimierens zu wählen, wenn das Überwachen eine größere (kleinere) Optimierungszeitdauer indiziert. Kleinere (größere) Taktraten und eine kleinere (größere) Anzahl von Zeitpunkten können in einer kleineren (größeren) Zeitdauer, die zumindest für das Optimieren des Posen-Graph in den verschiedenen Iterationen benötigt wird, resultieren.

[0058] Derart können zu lange Optimierungszeitdauern vermieden werden. In anderen Worten kann es vorzugsweise möglich sein, die Optimierungszeitdauer flexibel anzupassen.

[0059] Zum Beispiel kann die Taktrate im Bereich von 1 Hz–1.000 Hz liegen oder im Bereich von 10 Hz–100 Hz liegen, oder im Bereich von 25–50 Hz liegen.

[0060] Grundsätzlich ist es möglich, dass zumindest einige der Abtastraten eine Zeitabhängigkeit aufweisen. Z.B. können vorzugsweise zumindest einige der Abtastraten zeitliche Schwankungen aufweisen. In anderen Worten kann es vorteilhafterweise möglich sein, Ausgaben von Positioniersysteme beim Erzeugen des Posen-Graphen zu berücksichtigen, die Positionsdaten nicht mit einer konstanten Abtastrate bereitstellen. Zum Beispiel ist es vorzugsweise möglich, dass zumindest eine der Abtastraten im Bereich von 0,1 Hz–100 Hz liegt, oder im Bereich 0,5 Hz bis 10 Hz liegt, oder im Bereich von 0,5 Hz bis 2 Hz liegt.

[0061] In den verschiedenen hierin beschriebenen Szenarien kann es auch möglich sein, dass die Ausgabe von zumindest einem der Positioniersysteme die zugehörigen Positionsdaten nicht in zeitsequentieller Reihenfolge bereitstellt (engl. out-of-order). Es kann in vorteilhaften Szenarien möglich sein – z.B. im Gegensatz zu Referenzimplementierungen basierend auf einem Kalmanfilter – solche nicht-zeitsequentiell erhaltenen Positionsdaten beim Erzeugen des Posen-Graphen zu berücksichtigen.

[0062] Insbesondere kann es zum Beispiel möglich sein, dass zumindest eine der Abtastraten Unterbrechungen aufweist. Zum Beispiel können die Unterbrechungen mehr als zwei Abtastintervalle der entsprechenden

Abtastrate umfassen. Zum Beispiel können die Unterbrechungen mehr als 10 Abtastintervalle umfassen. Zum Beispiel können die Unterbrechungen mehr als 100 Abtastintervalle umfassen.

[0063] Die Unterbrechungen können Aussetzer darstellen, während welchen keine oder keine belastbaren Positionsdaten des entsprechenden Positioniersystems vorhanden sind.

[0064] In anderen Worten kann es also möglich sein, dass Aussetzer beim Bereitstellen von Ausgaben der verschiedenen Positioniersysteme kompensiert werden. Der Posen-Graph kann mit einer flexiblen Anzahl von Ausgaben verschiedener Positioniersysteme erzeugt werden.

[0065] Zum Beispiel ist es in vorteilhaften Szenarien möglich, dass die Absolut-Positionsdaten basierend auf der Ausgabe eines ersten Absolut-Positioniersystems jeweils für mehrere Zeitpunkte in einem ersten Zeitintervall ermittelt werden; die Absolut-Positionsdaten können vorzugsweise basierend auf der Ausgabe eines zweiten Absolut-Positioniersystems jeweils für mehrere Zeitpunkte in einem zweiten Zeitintervall ermittelt werden. Das erste Absolut-Positioniersystem kann vorteilhafterweise verschieden von dem zweiten Absolut-Positioniersystem sein. Die Absolut-Positionsdaten können vorzugsweise für die mehreren Zeitpunkte in dem ersten Zeitintervall nicht basierend auf der Ausgabe des zweiten Absolut-Positioniersystems ermittelt werden.

[0066] Deshalb kann z.B. das erste Zeitintervall einer Unterbrechung in Bezug auf die Ausgabe des zweiten Absolut-Positioniersystems darstellen. Das Verfahren kann in vorteilhaften Szenarien umfassen: Umschalten zwischen der Ausgabe des ersten Absolut-Positioniersystems und der Ausgabe des zweiten Absolut-Positioniersystems zum Ende des ersten Zeitintervalls.

[0067] In verschiedenen bevorzugten Szenarien kann es also möglich sein, dass je nach Zeitpunkt unterschiedliche Ausgaben von Positioniersystemen berücksichtigt werden. Z.B. kann es in vorteilhaften Implementierungen möglich sein, flexibel zwischen den Ausgaben der ersten und zweiten Absolut-Positioniersysteme beim Erzeugen des Posen-Graphen umzuschalten. Das Umschalten kann graduell erfolgen. Insbesondere in Übergangssituationen kann es derart möglich sein, die Position der Maschine mit einer hohen Zuverlässigkeit zu schätzen.

[0068] Gemäß einem weiteren Aspekt betrifft die vorliegende Erfindung ein Steuergerät. Das Steuergerät umfasst mindestens eine Schnittstelle. Die mindestens eine Schnittstelle ist eingerichtet, um jeweils Ausgaben von mindestens einem Odometrie-Positioniersystem zu empfangen und um jeweils Ausgaben von mindestens einem Absolut-Positioniersystem zu empfangen. Das Steuergerät umfasst weiterhin mindestens einen Prozessor. Der mindestens eine Prozessor ist eingerichtet, um jeweils für jeden von mehreren Zeitpunkten Odometrie-Positionsdaten der Maschine basierend auf den Ausgaben des mindestens einen Odometrie-Positioniersystems zu ermitteln. Der mindestens eine Prozessor ist weiterhin eingerichtet, um jeweils für jeden der mehreren Zeitpunkte Absolut-Positionsdaten der Maschine basierend auf den Ausgaben des mindestens einen Absolut-Positioniersystems zu ermitteln. Der mindestens eine Prozessor ist weiterhin eingerichtet, um einen Posen-Graph zu erzeugen. Kanten des Posen-Graphen entsprechen den Odometrie-Positionsdaten. Knoten des Posen-Graphen entsprechen den Absolut-Positionsdaten. Der mindestens eine Prozessor ist weiterhin eingerichtet, um den Posen-Graph zum Erhalten einer geschätzten Position des Kraftfahrzeugs zu optimieren. Der mindestens eine Prozessor ist weiterhin eingerichtet, um nach dem Optimieren einen Knoten des Posen-Graphen auszuwählen, für den ausgewählten Knoten einen Fixknoten des Posen-Graphen zu bestimmen und den ausgewählten Knoten aus dem Posen-Graph zu entfernen.

[0069] Das Steuergerät gemäß dem gegenwärtig diskutierten Aspekt ist eingerichtet, um das Verfahren gemäß einem weiteren Aspekt der vorliegenden Erfindung auszuführen.

[0070] Für ein solche Steuergerät gemäß den gegenwärtig diskutierten Aspekt können Effekte erzielt werden, die vergleichbar sind mit den Effekten, die für das Verfahren gemäß einem weiteren Aspekt der vorliegenden Erfindung erzielt werden können.

[0071] Die oben dargelegten Merkmale und Merkmale, die nachfolgend beschrieben werden, können nicht nur in den entsprechenden explizit dargelegten Kombinationen verwendet werden, sondern auch in weiteren Kombinationen oder isoliert, ohne den Schutzbereich der vorliegenden Erfindung zu verlassen.

KURZBESCHREIBUNG DER FIGUREN

[0072] Nachfolgend wird die vorliegende Erfindung anhand bevorzugter Ausführungsformen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen näher erläutert. In den Figuren bezeichnen gleiche Bezugszeichen gleiche oder ähnliche Elemente.

[0073] Fig. 1 ist eine schematische Illustration des logischen Informationsflusses im Rahmen der Fusion von Positionsdaten mehrerer Positioniersysteme auf Grundlage eines Posen-Graphen gemäß verschiedener Ausführungsformen.

[0074] Fig. 2 illustriert schematisch die Verfügbarkeit der unterschiedlichen Positionsdaten für Zeitpunkte in unterschiedlichen Zeitintervallen in einer Übergangssituation gemäß verschiedener Ausführungsformen.

[0075] Fig. 3 illustriert schematisch die Verfügbarkeit bestimmter Positionsdaten zu verschiedenen Zeitpunkten gemäß verschiedener Ausführungsformen, wobei in Fig. 3 eine Unterbrechung, bei welcher temporär keine Positionsdaten verfügbar sind, illustriert ist.

[0076] Fig. 4 illustriert schematisch ein Steuergerät gemäß verschiedener Ausführungsformen.

[0077] Fig. 5 ist ein Flussdiagramm eines Verfahrens gemäß verschiedener Ausführungsformen.

[0078] Fig. 6 illustriert schematisch das Erzeugen von Knoten eines Posen-Graphen auf Grundlage von Roh-Absolut-Positionsdaten gemäß verschiedener Ausführungsformen, wobei die Roh-Absolut-Positionsdaten von zwei Absolut-Positioniersystemen mit unterschiedlichen Abtastraten empfangen werden.

[0079] Fig. 7 illustriert schematisch das Erzeugen von Kanten des Posen-Graphen der Fig. 6 auf Grundlage von Roh-Odometrie-Positionsdaten gemäß verschiedener Ausführungsformen, wobei die Roh-Odometrie-Positionsdaten von einem Odometrie-Positioniersystem mit einer bestimmten Abtastrate empfangen werden.

[0080] Fig. 8 illustriert schematisch den Posen-Graph der Fig. 6 und Fig. 7, bevor der Posen-Graph optimiert wird.

[0081] Fig. 9 illustriert schematisch den optimierten Posen-Graph der Fig. 6–Fig. 8 und illustriert weiterhin eine aus dem optimierten Posen-Graph erhaltene geschätzte Position eines Kraftfahrzeugs.

[0082] Fig. 10 illustriert schematisch einen Posen-Graphen gemäß verschiedener Ausführungsformen.

[0083] Fig. 11 illustriert schematisch eine Systemmatrix für den Posen-Graphen der Fig. 10 gemäß verschiedener Ausführungsformen.

[0084] Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 und Fig. 15 illustrieren schematisch die Marginalisierung eines Posen-Graphen unter Verwendung eines Fixknotens.

[0085] Fig. 16 ist ein Flussdiagramm eines Verfahrens gemäß verschiedener Ausführungsformen.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG VON AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0086] Nachfolgend wird die vorliegende Erfindung anhand bevorzugter Ausführungsformen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen näher erläutert. In den Figuren bezeichnen gleiche Bezugszeichen gleiche oder ähnliche Elemente. Die Figuren sind schematische Repräsentationen verschiedener Ausführungsformen der Erfindung. In den Figuren dargestellte Elemente sind nicht notwendigerweise maßstabsgetreu dargestellt. Vielmehr sind die verschiedenen in den Figuren dargestellten Elemente derart wiedergegeben, dass ihre Funktion und genereller Zweck dem Fachmann verständlich wird. In den Figuren dargestellte Verbindungen und Kopplungen zwischen funktionellen Einheiten und Elementen können auch als indirekte Verbindung oder Kopplung implementiert werden. Eine Verbindung oder Kopplung kann drahtgebunden oder drahtlos implementiert sein. Funktionale Einheiten können als Hardware, Software oder eine Kombination aus Hardware und Software implementiert werden.

[0087] Nachfolgend werden Techniken zur Positionsbestimmung einer Maschine, wie z. B. einem Kraftfahrzeug beschrieben, welche es erlauben, Odometrie-Positionsdaten mindestens eines Odometrie-Positionier-

systems und Absolut-Positionsdaten mindestens eines Absolut-Positioniersystems zu fusionieren. Der Einfachheit wegen wird nachfolgend auf ein Kraftfahrzeug Bezug genommen, obwohl entsprechende Techniken auch für andere Maschinen angewendet werden können.

[0088] Insbesondere werden nachfolgend Techniken geschrieben, welche es erlauben, eine geschätzte Position des Kraftfahrzeugs zu bestimmen, welche für eine Fahrerassistenzfunktionalität verwendet werden kann. Z.B. kann die Fahrerassistenzfunktionalität autonomes Fahren betreffen. Es sind auch andere Fahrerassistenzfunktionalitäten denkbar.

[0089] Verschiedene hierin offenbarte Beispiele erlauben es, die Fusion der verschiedenen Positionsdaten auf Grundlage eines Posen-Graphen durchzuführen. Der Posen-Graph kann optimiert werden, um die Position des Kraftfahrzeugs abzuschätzen.

[0090] Dabei werden für jeden von mehreren Zeitpunkten Odometrie-Positionsdaten eines Kraftfahrzeugs basierend auf der Ausgabe mindestens eines Odometrie-Positioniersystems ermittelt und weiterhin Absolut-Positionsdaten des Kraftfahrzeugs basierend auf einer Ausgabe mindestens eines Absolut-Positioniersystems ermittelt. Der Posen-Graph wird erzeugt, wobei Knoten des Posen-Graphen den Absolut-Positionsdaten entsprechen und wobei Kanten des Posen-Graphen den Odometrie-Positionsdaten entsprechen. Der Posen-Graph wird dann optimiert.

[0091] Hierin werden Techniken beschrieben, die es ermöglichen, den Posen-Graphen effizient und ohne Genauigkeitsverlust zu marginalisieren. Dabei wird ein zu optimierender Knoten durch einen Fixknoten ersetzt.

[0092] In **Fig. 1** sind verschiedene Aspekte in Bezug auf einen Arbeitsablauf zur Positionsbestimmung mittels Sensorfusion illustriert. Es werden Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106** als Ausgaben von zwei Absolut-Positioniersystemen **101**, **102** empfangen. Ferner werden Roh-Odometrie-Positionsdaten **115**, **116** als Ausgaben von zwei Odometrie-Positioniersystemen **111**, **112** empfangen. Zum Beispiel könnte ein Software-Modul **151** die entsprechenden Positionsdaten **105**, **106**, **115**, **116** auf einem dedizierten Ausführungsstrang (engl. thread) empfangen. Ein Speicher (in **Fig. 1** nicht gezeigt) kann die empfangenen Positionsdaten **105**, **106**, **115**, **116** zwischenspeichern, bis sie verworfen werden.

[0093] Es ist dann möglich, in regelmäßigen, einstellbaren Zeitintervallen – das heißt mit einer Optimierungstaktrate – einen Konstruktionsprozess zum Erzeugen des Posen-Graphen durch eine Graphenverwaltung **152** anzustoßen. Dabei kann zum Beispiel der in einer vorangehenden Iteration der Optimierungstaktrate erzeugte Posen-Graph jeweils um neue Knoten und Kanten erweitert werden.

[0094] Der Posen-Graph kann in verschiedenen Szenarien Knoten aufweisen, die in festen Zeitabständen angeordnet sind. Entsprechend ist es möglich, dass mehrere Zeitpunkte, für die Knoten zu dem Posen-Graph hinzugefügt werden, basierend auf einer vorgegebenen Taktrate ermittelt werden. Für jeden der mehreren Zeitpunkte können dann entsprechende Odometrie-Positionsdaten und Absolut-Positionsdaten basierend auf den Roh-Odometrie-Positionsdaten und den Roh-Absolut-Positionsdaten ermittelt werden und jeweils mit zu optimierenden Kanten bzw. Knoten des Posen-Graphen assoziiert werden, z.B. in Form von Randbedingungen.

[0095] Z.B. kann die Optimierungstaktrate gleich oder ungleich der Taktrate der Knoten des Posen-Graphen sein.

[0096] Nachdem der Posen-Graph erzeugt wurde, kann die Optimierung durchgeführt werden. Dazu wird der erzeugte Posen-Graph an ein Backend **153** übergeben. Das Backend **153** führt dann die Optimierung aus. Als Ergebnis der Optimierung wird eine IST-Position des Kraftfahrzeugs erhalten.

[0097] Dabei kann in den verschiedenen hierin offenbarten Szenarien die IST-Position eine Vorhersage für einen zukünftigen Zeitpunkt sein, um Latenzzeiten aufgrund der Erzeugung des Posen-Graphen durch die Graphenverwaltung **152** und das Durchführen der Optimierung durch das Backend **153** zu kompensieren. Zum Beispiel wäre es möglich, dass die IST-Position eine Vorhersage der Position des Kraftfahrzeugs für den nächsten Takt der vorgegebenen Optimierungstaktrate ist.

[0098] Mittels solcher Techniken zur Positionsbestimmung auf Grundlage des Posen-Graphen ist es möglich, flexibel Positionsdaten **105**, **106**, **115**, **116** zu berücksichtigen, die aus unterschiedlichsten Positioniersystemen **101**, **102**, **111**, **112**, **113** stammen, siehe **Fig. 2**. Dabei ist der konkrete Typ des verwendeten Positioniersystems

101, 102, 111–113 nicht wesentlich für die Funktionsweise der hierin beschriebenen Techniken zur Positionsbestimmung; es können unterschiedlichste Typen und Arten von Positioniersystemen **101, 102, 111–113** in den verschiedenen hierin offenbarten Szenarien verwendet werden.

[0099] Zum Beispiel können Satelliten-basierte Positioniersysteme zum Bereitstellen der Absolut-Positionsdaten **105, 106** verwendet werden; ein Beispiel ist das Global Positioning System (GPS). Zum Beispiel kann eine Erkennung von maschinenlesbaren Zeichen **101** als Positioniersystem zum Bereitstellen der Absolut-Positionsdaten **105, 106** verwendet werden. Zum Beispiel könnte eine Laser-basierte Abstandsmessung **111** (engl. Light detection and ranging, LIDAR) zum Bestimmen von Absolut-Positionsdaten **105, 106** und / oder Odometrie-Positionsdaten **115, 116** verwendet werden. Auch die visuelle Posenerkennung **112** kann basierend auf Unterschieden in sequentiell aufgenommenen Bildern, die eine Landmarke abbilden, die Odometrie-Positionsdaten **115, 116** bereitstellen. Informationen aus der Fahrwerk-Odometrie **113** können zum Bereitstellen der Odometrie-Positionsdaten **115, 116** verwendet werden; zum Beispiel können in diesem Zusammenhang ein Lenkwinkel und/oder eine Drehgeschwindigkeit der Räder berücksichtigt werden. Es könnten auch Beschleunigungssensoren zum Bereitstellen der Odometrie-Positionsdaten **115, 116** verwendet werden; zum Beispiel könnte ein elektronisches Stabilitätssystem (ESP) als Beschleunigungssensor verwendet werden.

[0100] Eine weitere Quelle für die Positionsdaten könnten car2car-Systeme sein: diese können entweder direkt die Position eines Fahrzeugs bestimmen oder eine indirekte Positionsbestimmung über die Position eines dritten Fahrzeugs ermöglichen, wobei dann die Relativpositionierung zum dritten Fahrzeug berücksichtigt werden kann.

[0101] Stereo- und/oder Monokameras können nicht nur zur Bereitstellung von Odometrie-Positionsdaten genutzt werden, sondern alternativ oder zusätzlich zur Bereitstellung von Absolut-Positionsdaten. Hierfür gibt es verschiedene Ansätze: es ist z.B. möglich, eine visuelle Karte einer Strecke zu erstellen und beim erneuten Durchfahren eine Lokalisierung in der Karte vorzunehmen.

[0102] Techniken der simultanen Lokalisierung und Kartenerstellung (engl. Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) können auch als Quelle für Positionsdaten dienen. Z.B. können SLAM-Techniken Absolut-Positionsdaten in einem globalen Koordinatensystem bereitstellen oder alternativ oder zusätzlich Odometrie-Positionsdaten bereitstellen.

[0103] Weitere Beispiele für Positioniersysteme umfassen: Techniken basierend auf RFID-Markern. Techniken basierend auf WLAN-Netzen, die aktuell empfangen werden und / oder basierend auf einer Triangulation in einer bekannten WLAN-Netzwerke-Karte. Es können auch Mobilfunkmasten ausgelesen werden.

[0104] In den verschiedensten hierin beschriebenen Szenarien kann es jeweils auch möglich sein, durch Differenzbildung von zwei zeitsequentiellen Absolut-Positionsdaten Odometrie-Positionsdaten zu erzeugen.

[0105] Aus **Fig. 2** ist ersichtlich, dass einerseits die Zeitintervalle **201**, in welchen die verschiedenen Positioniersysteme **101, 102, 111–113** die zugehörigen Positionsdaten bereitstellen, verschieden voneinander sind. **Fig. 2** stellt eine sogenannte Übergangssituation dar: die von LIDAR **111**, der Erkennung von maschinenlesbaren Zeichen **101** und der visuellen Posenerkennung **112** bereitgestellten Positionsdaten **105, 106, 115, 116** brechen ab; dafür werden Positionsdaten des GPS-Systems **106** verfügbar. Eine entsprechende Situation kann sich zum Beispiel beim Verlassen eines Parkhauses ergeben. Dies bedeutet, dass zunächst die Absolut-Positionsdaten **105** aus der Erkennung maschinenlesbarer Zeichen **101** erhalten werden und nicht von dem GPS-System **106**; anschließend werden die Absolut-Positionsdaten **106** von dem GPS-System **102** erhalten. In den verschiedenen hierin beschriebenen Szenarien kann also zwischen unterschiedlichen Quellen für die Positionsdaten **105, 106, 115, 116** umgeschaltet werden; dies bedeutet, dass in den verschiedenen hierin beschriebenen Szenarien zwischen den unterschiedlichen Positioniersysteme **101, 102, 111–113** umgeschaltet werden kann. Das Umschalten kann graduell erfolgen. Das Umschalten kann Situationsangepasst erfolgen. Das Umschalten kann unter Berücksichtigung von Übergangsphasen zwischen den verschiedenen Positioniersystemen erfolgen.

[0106] In **Fig. 2** ist ferner illustriert, dass sich die Abtastraten **202**, mit welchen die verschiedenen Positioniersysteme **101, 102, 111–113** die zugehörigen Roh-Positionsdaten bereitstellen, voneinander abweichen.

[0107] In verschiedenen Szenarien ist es auch möglich, dass die Abtastrate **202** eine Unterbrechung **203** aufweist, siehe **Fig. 3**. In **Fig. 3** ist die Abtastrate **202** als Funktion der Zeit aufgetragen. In einen solchen Szenario ist es möglich, dass während der Unterbrechung **203** das entsprechende Positioniersystem **101, 102,**

111–113 keine oder keine signifikanten Ausgaben bereitstellt. Eine Unterbrechung **203** kann insbesondere dann vorliegen, wenn wesentlich weniger Roh-Positionsdaten bereitstehen, als durch eine Taktrate, mit der Knoten in den Posen-Graph eingefügt werden, gefordert. Kurze Unterbrechungen **203** können kompensiert werden, beispielsweise durch Interpolation. Grundsätzlich ist es aber möglich, dass die Unterbrechung **203** vergleichsweise lang ist. Zum Beispiel kann die Unterbrechung **203** mehrere Abtastintervalle der Abtastrate **202** umfassen. In dem Szenario der **Fig. 3** beträgt die Abtastrate **202** in etwa 1 Hz vor und nach der Unterbrechung **203**. Dies bedeutet, dass ein Abtastintervall eine Länge von ca. 1 Sekunde aufweist. Die Unterbrechung **203** weist eine Zeitdauer von ca. 12 Sekunden auf, umfasst also mehr als 10 Abtastintervalle.

[0108] Grundsätzlich ist es auch möglich, dass die Abtastrate **202** – außerhalb einer Unterbrechung **203** – als Funktion der Zeit variiert. Zum Beispiel könnte je nach verfügbaren Signalqualität das Satelliten-basierte Positionssystem **106** eine höhere oder geringere Abtastrate **202** implementieren.

[0109] Nachfolgend werden Techniken beschrieben, um die IST-Position **190** des Kraftfahrzeugs durchgängig und zuverlässig mit einer hohen Genauigkeit zu bestimmen. Diese Techniken können auch in Übergangssituationen oder bei voneinander abweichenden bzw. mit Unterbrechungen **203** versehenen Abtastraten **201** zuverlässig und genau die IST-Position **190** bestimmen.

[0110] **Fig. 4** illustriert ein Steuergerät **120** welches zum Durchführen entsprechender Techniken eingerichtet ist. Das Steuergerät **120** umfasst eine Schnittstelle **121**, welche mit den verschiedenen Positioniersystemen **101**, **102**, **111**, **112** kommuniziert. Ferner umfasst das Steuergerät **120** einen Prozessor **123**, der mit der Schnittstelle **121** und einem Speicher **124** gekoppelt ist. Zum Beispiel kann der Speicher **124** die verschiedenen Positionsdaten **105**, **106**, **115**, **116** zwischenspeichern bzw. puffern. Der Prozessor **123** kann eingerichtet sein, um verschiedenste Techniken, die hierin im Zusammenhang mit dem Ermitteln der Odometrie-Positionsdaten und der Absolut-Positionsdaten auf Grundlage jeweils der Roh-Odometrie-Positionsdaten und der Roh-Absolut-Positionsdaten, dem Erzeugen des Posen-Graphen und dem Optimieren des Posen-Graphen, sowie dem Steuern der Fahrerassistenzfunktionalität beschrieben sind, durchzuführen. Zum Steuern der Fahrerassistenzfunktionalität **129** umfasst das Steuergerät **120** eine weitere Schnittstelle **122**. Die verschiedenen Schnittstellen **121**, **122** können eingerichtet sein, um zum Beispiel über ein Bus-System des Kraftfahrzeugs mit den verschiedenen Einheiten zu kommunizieren. Es sind auch direkte Datenverbindungen möglich.

[0111] Zum Beispiel können in dem Speicher **124** Steuerdaten hinterlegt sein, die von dem Prozessor **123** ausgeführt werden können. Ausführen der Steuerdaten durch den Prozessor **123** kann bewirken, dass der Prozessor **123** ein Verfahren ausführt, wie es im Zusammenhang mit dem Flussdiagramm der **Fig. 5** illustriert ist.

[0112] Zunächst wird in Schritt **1** überprüft, ob die nächste Iteration für das Erzeugen und Optimieren eines Posen-Graphen durchgeführt werden soll; dafür kann eine vorgegebene Optimierungstaktrate berücksichtigt werden. Für jede Iteration wird eine IST-Position **190** erhalten.

[0113] Optional kann in allen hierin beschriebenen Beispielen für jede Iteration auch eine IST-Odometrie erhalten werden. Z.B. kann es möglich sein, die IST-Odometrie auf Grundlage der beiden letzten Optimierungsknoten zu berechnen, d.h., unter Berücksichtigen der zurückgelegten Strecke und der erfolgten Drehung. Daraus kann z.B. auf die Geschwindigkeit und die Drehrate zurückgeschlossen werden.

[0114] Wenn die nächste Iteration durchgeführt werden soll, werden in Schritt **2** zunächst für mehrere Zeitpunkte Absolut-Positionsdaten auf Grundlage von Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106** ermittelt. Dies ist in **Fig. 6** illustriert. In **Fig. 6** ist der Posen-Graph **661** lediglich in Bezug auf Knoten **671** illustriert. Der Posen-Graph **661** ist in **Fig. 6** im zweidimensionalen xy-Ortsraum dargestellt. Der Posen-Graph **661** umfasst Optimierungsknoten **671** zu den Zeitpunkten **t.1**, **t.3**, **t.5**, **t.8** und **t.11**. Die Zeitpunkte **t.1**, **t.3**, **t.5**, **t.8** und **t.11** weisen einen festen Zeitabstand zueinander auf und sind entsprechend einer Taktrate bestimmt.

[0115] In den verschiedenen hierin offenbarten Szenarien können unterschiedlichste Taktraten berücksichtigt werden. Zum Beispiel kann die Taktrate im Bereich von 1 Hz bis 1000 Hz liegen, bevorzugt im Bereich von 10 Hz bis 100 Hz, besonders bevorzugt im Bereich von 25 Hz bis 50 Hz. Derart kann die IST-Position zügig und mit einer hinreichend hohen Zuverlässigkeit bestimmt werden.

[0116] In den verschiedenen hierin offenbarten Szenarien ist es möglich, dass die Taktrate veränderlich ist und flexibel bestimmt wird. Zum Beispiel kann eine höhere Taktrate einer größeren Anzahl von Knoten **671** entsprechen, sodass wiederum die Optimierungszeitdauer zunimmt; deshalb kann es erstrebenswert sein, in

Abhängigkeit von einem Überwachen der Optimierungszeitdauer die Taktrate zu bestimmen. Derart kann eine bestimmte Optimierungstaktrate auch für rechenintensive Posen-Graphen **661** gewährleistet werden.

[0117] Die Knoten **671** entsprechen den Absolut-Positionsdaten **605**, **606** (in **Fig. 6** mit gestricheltgefüllten Kreisen und Quadraten dargestellt). Die Absolut-Positionsdaten **605**, **606** bilden insbesondere Randbedingungen für die Knoten **671**. Die Absolut-Positionsdaten **605**, **606** werden basierend auf den Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106** bestimmt. Dabei werden die Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106** mit Abtastraten erhalten, die sich von der Taktrate unterscheiden; z.B. werden Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106** zu den Zeitpunkten t.2, t.4, t.4a, t.6, t.7, t.9, t.10 und t.12 erhalten. Die Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106** weisen entsprechende Zeitstempel auf. Deshalb werden die Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106** zum Erhalten der Absolut-Positionsdaten **605**, **606** interpoliert (in **Fig. 6** durch die durchgezogenen Linien **662** dargestellt). Zum Beispiel werden die Roh-Absolut-Positionsdaten **105** zu den Zeitpunkten t.2 und t.4 zum Erhalten der Absolut-Positionsdaten **605** zum Zeitpunkt t.3 interpoliert. Die Interpolation stellt also eine Schätzung dar, wo das entsprechende Positioniersystem zum Zeitpunkt t.3 das Kraftfahrzeug vermutet hätte.

[0118] Alle Zeitpunkte t.1–t.13 liegen innerhalb des Zeitfensters $[t_0 - T; t_0]$, wobei t_0 die IST-Zeit darstellt. T bezeichnet eine Zeitdifferenz. Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106**, die nicht innerhalb dieses Zeitfensters liegen, werden verworfen, d.h. nicht in den Posen-Graph **661** übernommen und z.B. aus dem Speicher gelöscht. Dadurch kann die Menge der Knoten **671** des Posen-Graphen **661** begrenzt werden; dadurch wird die zum Optimieren benötigte Zeitdauer reduziert. Gleichzeitig wird die jüngere Vergangenheit der Posen des Kraftfahrzeugs berücksichtigt, so dass die Zuverlässigkeit, mit der die IST-Position **190** abgeschätzt werden kann, vergleichsweise hoch ist.

[0119] In manchen Szenarien kann es vorkommen dass z.B. Odometrie-Positioniersysteme, die Ausgaben mit einer vergleichsweise sehr hohen Abtastrate bereitstellen, Messungen durchführen, die gegenüber dem Zeithorizont t_0 in der Zukunft liegen. Dies kann aufgrund einer internen Vorhersage des Odometrie-Positioniersystems vorkommen. Es ist möglich, entsprechende Roh-Odometrie-Positionsdaten beim Erzeugen des Posen-Graphen **661** zu berücksichtigen.

[0120] Ferner werden die Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106** basierend auf einer Datendichte der Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106** im Zeitraum und basierend auf der Taktrate selektiv verworfen. Zum Beispiel sind im Zeitbereich t.1–t.6 nur sehr wenige Roh-Absolut-Positionsdaten **106** vorhanden – insbesondere im Vergleich zur Taktrate. Deshalb wären denn die Roh-Absolut-Positionsdaten **106** zum Zeitpunkt t.4a verworfen und beim Erzeugen des Posen-Graphen **661** nicht als Randbedingung z.B. für die Knoten **671** zu den Zeitpunkten t.3 oder t.5 berücksichtigt.

[0121] In anderen Beispielen können auch die Positionsdaten **106** zum Zeitpunkt t.4a zunächst im Speicher gepuffert verbleiben, aber nicht für das Erzeugen des Posen-Graphen **661** in der gegenwärtigen Iteration berücksichtigt werden. Das Löschen aus dem Speicher kann in einer späteren Iteration erfolgen, sofern keine nicht-zeitsequentiellen Positionsdaten **106** mehr erhalten werden.

[0122] In verschiedenen weiteren Szenarien wäre es zum Beispiel möglich, dass das selektive Verwerfen der verschiedenen Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106** auf der vorgegebenen Optimierungstaktrate basiert; zum Beispiel könnte für höhere (niedrigere) Optimierungstaktrate und eine größere (kleinere) Anzahl von Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106** verworfen werden.

[0123] Wieder Bezug nehmend auf **Fig. 5**, werden in Schritt **3** Odometrie-Positionsdaten ermittelt. Entsprechende Aspekte sind in Bezug auf **Fig. 7** illustriert. In **Fig. 7** sind die aus den Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106** ermittelten Knoten **671** dargestellt, die den Absolut-Positionsdaten **605**, **606** entsprechen (wobei in **Fig. 7** aus Gründen der Übersichtlichkeit die Randbedingungen nicht illustriert sind). Ferner sind in **Fig. 7** Roh-Odometrie-Positionsdaten **115** dargestellt, die mit einer vergleichsweise hohen Abtastrate erhalten werden; die Abtastrate ist größer als die Taktrate. In verschiedenen beispielhaften Szenarien kann es erforderlich sein, die Roh-Odometrie-Positionsdaten **115** vor dem Einfügen in den Posen-Graph **661** durch eine Koordinaten-Rotation in das Koordinatensystem des Posen-Graph **661** zu überführen (in **Fig. 7** nicht gezeigt). Die Roh-Odometrie-Positionsdaten **115** werden wiederum durch Interpolation in Odometrie-Positionsdaten **615**, die den Kanten **672** des Posen-Graphen **661** entsprechen, überführt.

[0124] Entsprechende Techniken, die obenstehend in Bezug auf das Verwerfen von Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106** offenbart sind, können auch auf die Roh-Odometrie-Positionsdaten **115**, **116** angewendet werden.

[0125] Wieder Bezug nehmend auf **Fig. 5**, wird anschließend in Schritt **4** der Posen-Graph **661**, d.h. die Knoten **671** und Kanten **672**, auf Grundlage der in Schritten **2** und **3** erzeugten Positionsdaten **105**, **106**, **115**, **116** erzeugt. Dazu werden die zu optimierenden Knoten **671** in gemäß der vorgegeben Taktrate bestimmten, zeitlich festen Abständen eingefügt.

[0126] In **Fig. 8** ist der zu optimierende Posen-Graph **661** dargestellt; insbesondere ist in Bezug auf die Knoten **661** durch die Verbindung zwischen den schematisch illustrierten Absolut-Positionsdaten **605** und den Optimierungsknoten **671** der Aspekt der Randbedingung grafisch illustriert. Ziel der Optimierung ist es, unter Berücksichtigung der Randbedingungen eine entsprechende Fehlerfunktion global zu minimieren. Die Kanten **672** bilden auch Randbedingungen für die Optimierung der Knoten **671**. Der Graph **661** wird zur Optimierung an das Backend **153** übergeben.

[0127] Wieder Bezug nehmend auf **Fig. 5**: anschließend wird in Schritt **5** der Posen-Graph **661** optimiert. Dann kann angenommen werden, dass der optimierte Posen-Graph **661** einen bestmöglichen Kompromiss aus den verschiedenen Positionsdaten **105**, **106**, **115**, **116** der zu fusionierenden Positioniersysteme **101**, **102**, **111–113** darstellt.

[0128] In **Fig. 9** sind Aspekte des optimierten Posen-Graph **661** dargestellt. In **Fig. 9** sind die nunmehr optimierten Knoten **671** dargestellt, sowie die abgeschätzt IST-Position **190** des Kraftfahrzeugs. Aus **Fig. 9** ist ersichtlich, dass die IST-Position **190** für den zukünftigen Zeitpunkt **t.13** vorhergesagt wird (in **Fig. 9** durch die gepunktete Linie illustriert). Dadurch kann eine Latenzzeit für das Optimieren des Posen-Graphen **661** kompensiert werden. Durch die Vorhersage der IST-Position **190** kann erreicht werden, dass zu Beginn einer nächsten Iteration gemäß Schritt **1** der **Fig. 5** bereits eine aktuelle Abschätzung der Position **190** vorliegt.

[0129] Zur Vorhersage der IST-Position **190** kann in verschiedenen Beispielen eine Interpolation der letzten beiden optimierten Knoten **671** erfolgen. Daraus kann eine Eigenbewegung des Kraftfahrzeugs bestimmt werden und optional ausgegeben werden. Unter der Annahme, dass sich das Kraftfahrzeug in naher Zukunft genauso verhält, wie in der letzten bekannten Vergangenheit, wird diese Eigenbewegung an den jüngsten optimierten Knoten **671** per Vektoraddition angehängen.

[0130] Die IST-Position **190** wird mit einer bestimmten Genauigkeit bestimmt, welche invers proportional zu einer Zuverlässigkeit **191** (in **Fig. 9** mittels der Fehlerbalken illustriert) ist. Die Zuverlässigkeit **191** kann auch zum Steuern der Fahrerassistenzfunktionalität **129** berücksichtigt werden.

[0131] **Fig. 10** illustriert einen Posen-Graphen **661**, der mittels der voranstehend beschriebenen Techniken bestimmt werden kann. Der Posen-Graph **661** weist mehrere Knoten **671** auf, die in einem festen zeitlichen Abstand zueinander an den Zeitpunkten **t.1**, **t.2** und **t.3** angeordnet sind.

[0132] Den verschiedenen Knoten **671** sind jeweils Absolut-Positionsdaten **605**, **606** zugeordnet; diese Zuordnung kann in Form von Randbedingungen erfolgen (in **Fig. 10** durch die vertikalen Kanten des Posen-Graphen **661** dargestellt). Die Absolut-Positionsdaten **605**, **606** entsprechen dabei Fixknoten, da ihre Position im Rahmen der Optimierung des Posen-Graphen **661** nicht verändert wird. Dabei können Techniken der Interpolation angewendet werden; Roh-Absolut-Positionsdaten **105**, **106** können auf die Absolut-Positionsdaten **605**, **606** abgebildet werden, die an den Zeitpunkten **t.1**, **t.2** und **t.3** angeordnet sind, die den zu optimierenden Knoten **671** entsprechen. Anschließend können die Kanten **672** des Posen-Graphen **661** erzeugt werden, z.B. basierend auf den Odometrie-Positionsdaten **615**.

[0133] **Fig. 11** illustriert Aspekte in Bezug auf eine Systemmatrix **901**. Die Systemmatrix **901**, **H** ist die diejenige Matrix, die während der Optimierung invertiert wird, zum Beispiel mittels eines Gauss-Newton-Verfahrens oder eines Levenberg-Marquardt-Verfahrens. Dies kann dem Lösen folgender Gleichung entsprechen:

$$H\Delta x = -b \quad (1)$$

wobei Δx den Aktualisierungsvektor und **b** den Koeffizientenvektor bezeichnet. Typischerweise wird die Lösung der Gleichung **1** durch Invertieren schneller, wenn die Systemmatrix **901** dünn besetzt ist.

[0134] Die Systemmatrix **901** umfasst Diagonaleinträge **902**, welche von den Absolut-Positionsdaten **605**, **606** und den Odometrie-Positionsdaten **615** jeweils als Randbedingungen beeinflusst werden. Die Nicht-Diagonaleinträge **903** werden nur von den Odometrie-Positionsdaten **615** als Randbedingungen beeinflusst.

[0135] Sofern neue Knoten **671** jeweils dann eingefügt werden, wenn neue Absolut-Positionsdaten **605**, **606** und/oder neue Odometrie-Positionsdaten **615** verfügbar sind, resultiert eine verzweigte Struktur des Posen-Graphen **661** und damit auch eine verzweigte Struktur der Systemmatrix **901**. Deshalb ist es in verschiedenen Ausführungsformen erstrebenswert, von Zeit zu Zeit eine Marginalisierung des Posen-Graphen **661** durchzuführen.

[0136] Im Folgenden werden Techniken zur Marginalisierung im Detail beschrieben. Es wird ferner dargelegt, dass ein Fixknoten als Ersatz für einen ausgewählten bisherigen Knoten verwendet werden kann. Der Fixknoten kann die gleiche Information beinhalten wie das Schur-Komplement. Gleichzeitig kann ein solcher Fixknoten den Vorteil aufweisen, dass dieser Fixknoten explizit im Design des Posen-Graphen **661** wieder gefunden werden kann und dadurch gezielt manipuliert werden kann.

[0137] Herkömmlicherweise wird das Schur-Komplement auf die Gleichung 1 angewendet, um Zustandsvariablen aus dem Optimierungsproblem zu entfernen. Im Posen-Graphen **661** entspricht diese Operation dem Entfernen von Knoten **671**. Durch das Schur-Komplement ist sichergestellt, dass vor und nach der Anwendung die restlichen Knoten **671** den gleichen Schätzwert behalten. Würde man die Zustandsvariablen einfach löschen, hätte man einen anderen Schätzwert; dies bedeutet, dass das einfache Entfernen eines Knoten **671** die Abschätzung für die Position des Fahrzeugs verfälschen würde. Der Zustandsvektor besteht in einem Zeitfenster-Verfahren aus m Zustandsvariablen. Es wird nachfolgend gezeigt, wie man einen einzelnen Knoten **671**/eine einzelne Zustandsvariable marginalisieren kann. Sofern mehrere Knoten **671**/Zustandsvariablen marginalisiert werden sollen, ist es möglich, solche Techniken mehrfach hintereinander anzuwenden.

[0138] Nachfolgend wird eine beispielhafte Herleitung einer Möglichkeit, den Fixknoten zu bestimmen, beschrieben. Diese ist rein beispielhaft. Es sind auch andere Techniken zum Bestimmen des Fixknotens möglich. Es ist nützlich, für die Herleitung zunächst mit einem Posen-Graphen **661** zu beginnen, der lediglich zwei Knoten **671** und mehrere Randbedingungen aufgrund von Odometrie-Positionsdaten **615** und Absolut-Positionsdaten **605**, **606** aufweist. Eine solche Situation ist in Fig. 12 dargestellt. In dem Beispiel der Fig. 12 wird ein Knoten **971** (zum Beispiel in Fig. 13 mit x_a bezeichnet) ignoriert, vergleiche Fig. 12 und Fig. 13. Dies wird getan, um zu sehen, wie die verschiedenen Knoten **671**, **971** sich auf die Systemmatrix **901** auswirken. Im resultierenden Posen-Graphen **661** G^{small} für Fig. 12, in dem die übrigen Knoten **671**, x_b , x_c miteinander verbunden sind und die zusätzliche Randbedingungen **605**, **606**, **615** aufweisen, ist die zugehörige Optimierungsgleichung:

$$\begin{bmatrix} H_{bb}^{\text{small}} & H_{bc}^{\text{small}} \\ H_{cb}^{\text{small}} & H_{cc}^{\text{small}} \end{bmatrix} \Delta x^{\text{small}} = - \begin{bmatrix} b_b^{\text{small}} \\ b_c^{\text{small}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

[0139] Wenn der zusätzliche Knoten **971**, x_a berücksichtigt wird, verändert sich die Struktur des Posen-Graphen (vergleiche Fig. 13), als auch die Struktur der Systemmatrix **901**. Sei zusätzlich x_a mit mehreren globalen Fixknoten $\bar{x}_i$ verbunden, die Absolut-Positionsdaten **605** entsprechen, die die Informationsmatrizen $\bar{\Omega}_i$ besitzen, sodass $\bar{\Omega} = \sum_i \bar{\Omega}_i$

[0140] Außerdem soll es eine oder mehrere Kanten **672** zwischen x_a und x_b mit den Informationsmatrizen $\hat{\Omega}_{a,b}^j$ geben, so dass $\hat{\Omega} = \sum_j \hat{\Omega}_{a,b}^j$. Der resultierende Posen-Graph **661** G^{full} für das Beispiel der Fig. 13 wird definiert durch die Systemmatrix **901**:

$$H^{\text{full}} = \begin{bmatrix} H_{aa}^{\text{full}} & H_{ab}^{\text{full}} & H_{ac}^{\text{full}} \\ H_{ba}^{\text{full}} & H_{bb}^{\text{full}} & H_{bc}^{\text{full}} \\ H_{ca}^{\text{full}} & H_{cb}^{\text{full}} & H_{cc}^{\text{full}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\Omega} + \hat{\Omega} & -\hat{\Omega} & \\ -\hat{\Omega} & H_{bb}^{\text{small}} + \hat{\Omega} & H_{bc}^{\text{small}} \\ & H_{cb}^{\text{small}} & H_{cc}^{\text{small}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

und dem Koeffizientenvektor

$$b^{\text{full}} = \begin{bmatrix} b_a^{\text{full}} \\ b_b^{\text{full}} \\ b_c^{\text{full}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i \bar{\Omega}^i e_{i,a} + \sum_j \hat{\Omega}_{a,b}^j e_{a,b} \\ b_b^{\text{small}} + \sum_j -\hat{\Omega}_{a,b}^j e_{a,b} \\ b_c^{\text{small}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

wobei $e_{i,a}$ der Fehler ist zwischen den Fixknoten $\bar{x}_i$ für die Absolut-Positionsdaten **605**, **606** und dem zu optimierenden Knoten **971** x_a . Der Einfachheit halber werden alle Randbedingungen aufgrund von Odometrie-Positionsdaten **615** abgekürzt mit

$$b^{\text{rel}} = \sum_j \hat{\Omega}_{a,b}^j e_{a,b}$$

[0141] Der herkömmliche Weg, um den Knoten **971**, x_a „weg zu marginalisieren“, ist es, das Schur-Komplement auf H^{full} und b^{full} zu berechnen. Dies führt zu der marginalisierten Systemmatrix **901** H^{marg} , welche identisch ist zu H^{small} außer dass der linke obere Block sich ändert zu

$$H_{bb}^{\text{marg}} = H_{bb}^{\text{small}} + \hat{\Omega} - \hat{\Omega}(\bar{\Omega} + \hat{\Omega})^{-1}\hat{\Omega} \quad (5)$$

[0142] Der dazugehörige marginalisierte Koeffizientenvektor ist gegeben durch

$$b^{\text{marg}} = \begin{bmatrix} b_b^{\text{full}} + \hat{\Omega}(\bar{\Omega} + \hat{\Omega})^{-1}b_a^{\text{full}} \\ b_c^{\text{small}} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

[0143] Das bisherige Teilergebnis gibt vor, wie die Systemmatrix **901** nach der Marginalisierung aussehen kann. Dies wird benutzt, um den Fixknoten **972** (cf. Fig. 14) herzuleiten.

[0144] In einem solchen Fall kann der Fixknoten **972** das Schur-Komplement **972** des Knotens **971** darstellen.

[0145] Nachfolgend wird eine Gleichung hergeleitet, mit der die Pose und die Unsicherheit des Fixknotens **972**, $\bar{x}_p$ berechnet werden kann, um ihn in den Posen-Graphen **661** anstelle des Knotens **971**, x_a einzufügen. Wenn entweder Knoten **971**, x_a nicht mit mindestens einem Fixknoten, der Absolut-Positionsdaten **605**, **606** entspricht, oder wenn Knoten **971**, x_a nicht über eine Kante **672** mit dem benachbarten Knoten **671**, x_b verbunden ist, beeinflusst Knoten **971**, x_a den Knoten **671**, x_b nicht. In diesem Fall muss kein Fixknoten **972** berechnet werden, da auch die Marginalisierung äquivalent dazu ist, dass der Knoten **971** einfach gelöscht wird. Im Allgemeinen Fall jedoch ist dies nicht der Fall.

[0146] Als erstes wird der Knoten **971**, x_a und alle zugehörigen Fixknoten, die Absolut-Positionsdaten **605**, **606** entsprechen, und alle Kanten **672** zwischen dem Knoten **971**, x_a und dem Knoten **671**, x_b , entfernt. Wird nun der Fixknoten **972**, $\bar{x}_p$ mit der Informationsmatrix $\bar{\Omega}_p$ zu dem Knoten **671**, x_b , verbunden, wird der Graph G^{prior} erhalten (siehe Fig. 14). Der vorangestellte Fixknoten **972**, x_p führt zu einem zusätzlichen Summanden in der Systemmatrix H^{prior} von G^{prior} :

$$H^{\text{prior}} = \begin{bmatrix} H_{bb}^{\text{small}} + \bar{\Omega}_p & H_{bc}^{\text{small}} \\ H_{cb}^{\text{small}} & H_{cc}^{\text{small}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

[0147] Nun wird gezeigt, dass die Wahl von

$$\bar{\Omega}_p^{-1} = \hat{\Omega}^{-1} + \bar{\Omega}^{-1} \quad (8)$$

äquivalent ist zum Anbringen des Schur-Komplements bezüglich der resultierenden Unsicherheit. Es wird Äquivalenz zwischen den oberen linken Blöcken von H^{marg} und H^{prior} gefordert:

$$\begin{aligned}
\hat{\Omega} - \hat{\Omega}(\bar{\Omega} + \hat{\Omega})^{-1}\hat{\Omega} &= (\hat{\Omega}^{-1} + \bar{\Omega}^{-1})^{-1} \\
\Leftrightarrow \hat{\Omega} - \hat{\Omega}(\bar{\Omega} + \hat{\Omega})^{-1}\hat{\Omega} &= \bar{\Omega}(\hat{\Omega} + \bar{\Omega})^{-1}\hat{\Omega} \\
\Leftrightarrow \hat{\Omega}(\hat{\Omega} + \bar{\Omega})^{-1}(\hat{\Omega} + \bar{\Omega}) &= \hat{\Omega} \\
\Leftrightarrow \hat{\Omega} &= \hat{\Omega}.
\end{aligned}$$

[0148] Diese Herleitung zeigt, dass die obige Wahl für $\bar{\Omega}_p$ unsere Anforderungen erfüllt. Die nächste Frage ist, mit welcher Posenschätzung bzw. Position der Fixknoten **972**, $\bar{x}_p$ initialisiert wird.

[0149] Nun wird die Position $\bar{x}_p$ des Fixknotens **972**, $\bar{x}_p$ so festgelegt, dass alle Knoten **671** nach der Marginalisierung noch auf die selben Positionen wie vorher geschätzt werden. Dafür wird Gleichheit zwischen b^{marg} und b^{prior} gefordert. Eine genauere Analyse von b^{marg} zeigt

$$b^{\text{marg}} = \begin{bmatrix} b_b^{\text{small}} + b^{\text{rel}} + \hat{\Omega}(\bar{\Omega} + \hat{\Omega})^{-1}b_a^{\text{full}} \\ b_c^{\text{small}} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

[0150] Das Hinzufügen eines Fixknotens **972**, $\bar{x}_p$ mit der Posenschätzung $\bar{x}_p$ und Unsicherheit

$$\bar{\Omega}_p^{-1} = \bar{\Omega}^{-1} + \hat{\Omega}^{-1}$$

resultiert in

$$b^{\text{prior}} = \begin{bmatrix} b_b^{\text{small}} + \bar{\Omega}_p(x_b - \bar{x}_p) \\ b_c^{\text{small}} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

[0151] Fordern von Gleichheit zwischen b^{marg} und b^{prior} lässt uns nach $\bar{x}_p$ auflösen:

$$\bar{x}_p = x_b - \bar{\Omega}_p^{-1}[b_b^{\text{marg}} - b_b^{\text{small}}]. \quad (11)$$

[0152] Dies ist die analytische Lösung für $\bar{x}_p$. Damit kann der Fixknoten **972**, $\bar{x}_p$ konstruiert werden, nämlich seine Unsicherheit und seine Position. Das Anfügen des Fixknotens **972** mit dieser Position und Unsicherheit an den Posen-Graphen **661** führt zu den gleichen Effekten wie das Anwenden der Marginalisierung mit Hilfe des Schur-Komplements.

[0153] Die nach Gleichung 11 berechnete Position des Fixknotens **972** kann im Allgemeinen abweichen von der Position des gelöschten Knotens **971**.

[0154] Da der Fixknoten **972** transparent in dem Posen-Graphen **661** hinterlegt ist, kann es möglich sein, vor dem erneuten Durchführen einer Optimierung verschiedener Eigenschaften des Fixknotens **972** zu verändern. Zum Beispiel wäre es möglich, die Verlustfunktion der Kante **973** und/oder die Unsicherheit des Fixknotens **972** anzupassen. Beispiele für Verlustfunktionen umfassen: Huber-Loss-Funktion und m-Estimator. Eine derartige Anpassung kann es ermöglichen, besonders genaue Ergebnisse der Sensorfusion zu erzielen. Zum Beispiel kann die Optimierung den Fixknoten **972** umso stärker berücksichtigen, je geringer dessen Unsicherheit ist. Generell kann das Ortungsergebnis nach Optimierung des Fixknotens **972** näher an solchen Quellen liegen, die eine geringere Unsicherheit aufweisen. Die Verlustfunktion ist eine Technik, die es ermöglicht, die Unsicherheit zu verändern. Basierend darauf, wie gut bestimmte Positionsdaten zu weiteren Positionsdaten passen, kann die Unsicherheit skaliert werden.

[0155] Eine Verlustfunktion ist lediglich eine beispielhafte Möglichkeit, um die Unsicherheit zu skalieren. Weitere Techniken, um dies Unsicherheit zu bestimmen, umfassen zum Beispiel Karten-basierte Techniken: dabei kann das Vorwissen über eine Position, das durch den Fixknoten **972** ausgedrückt wird, in eine Straßenkarte eingezeichnet werden. Es kann dann analysiert werden, wie gut dieses Vorwissen zu der Karte passt. Liegt

der Fixknoten **972** beispielsweise neben der Straße, zum Beispiel in einem See, dann wäre die Unsicherheit dieses Fixknotens **972** stark erhöht. Dies ist der Fall, da die entsprechende Position unplausibel ist. Anders wäre die Unsicherheit einzuschätzen, wenn die Position des Fixknotens **972** auf einem Fahrstreifen liegt und dieser Fahrstreifen einer Straße zugeordnet ist, die in der Vergangenheit befahren wurde. Dann wäre zum Beispiel die Unsicherheit nicht zu erhöhen. Es ist also möglich, die Unsicherheit unter Berücksichtigung von Expertenwissen und/oder Kontextwissen anzupassen.

[0156] Aus Obenstehendem ist ersichtlich, dass der Posen-Graph **661** in Bezug auf den Knoten **971** durch Bestimmen des Fixknotens **972** marginalisiert werden kann. In dem Beispiel, welches in Bezug auf die **Fig. 12–Fig. 14** beschrieben wurde, wurde dabei der Knoten **971** ausgewählt, der dem ältesten Zeitpunkt $t.1$ entspricht. In anderen Fällen könnte jedoch auch ein anderer Knoten **671**, **971** ausgewählt werden.

[0157] Dabei können die Techniken, die obenstehend mit Bezug auf die **Fig. 12–Fig. 14** beschrieben wurden, wiederholt nacheinander ausgeführt werden, um weitere Knoten **671** zu entfernen. Zum Beispiel ist in Bezug auf **Fig. 15** ein Szenario dargestellt, bei dem der Knoten **671**, x_b ausgewählt und entfernt wurde und dafür ein weiterer Fixknoten **972** zum Posen-Graphen **661** hinzugefügt wurde.

[0158] **Fig. 16** ist ein Flussdiagramm eines Verfahrens gemäß verschiedener Ausführungsformen. Zunächst erfolgt in Schritt **1001** das Erzeugen eines Posen-Graphen **661**. Insbesondere kann in Schritt **1001** ein Posen-Graph **661** mit Ketten-Struktur erzeugt werden, wie oben stehend beschrieben.

[0159] Dann erfolgt in Schritt **1002** das Optimieren des Posen-Graphen **661**. Dabei kann die Position der Knoten **671** verändert werden. Das Optimieren berücksichtigt Randbedingungen, die durch die Kanten **672** bzw. die Fixknoten, die den Absolut-Positionsdaten **605**, **606** entsprechen. Beim Optimieren wird die Pose von Fixknoten nicht verändert.

[0160] Anschließend wird in Schritt **1003** überprüft, ob zwischenzeitlich weitere Positionsdaten **605**, **606**, **615** verfügbar geworden sind. Dabei kann zum Beispiel eine zwischenzeitliche Abtastrate, mit der die Position ihrer Systeme **101**, **102**, **111**, **112** Roh-Positionsdaten **105**, **106**, **115**, **116** bereitstellen, berücksichtigt werden.

[0161] Sind neue Positionsdaten **605**, **606**, **615** verfügbar, wird ein neuer Knoten **671** und/oder eine neue Kante **672** zu dem Posen-Graphen **661** hinzugefügt, siehe Schritt **1004**.

[0162] Dann wird in Schritt **1005** überprüft, ob eine Marginalisierung des Posen-Graphen **661** durchgeführt werden soll. Zum Beispiel kann in Schritt **1005** eine Anzahl der Knoten **671** des Posen-Graphen **661** berücksichtigt werden. Überschreitet zum Beispiel die Anzahl einen vorgegebenen Schwellenwert, so kann die Marginalisierung durchgeführt werden.

[0163] Wird in Schritt **1005** bestimmt, dass die Marginalisierung nicht durchgeführt werden soll, so werden Schritte **1002–1004** erneut durchgeführt. Andernfalls wird Schritt **1006** durchgeführt. In Schritt **1006** wird der Fixknoten **972** für einen ausgewählten Knoten **971** bestimmt und der ausgewählte Knoten **971** wird aus dem Posen-Graphen **661** entfernt. Der Fixknoten **972** wird dem Posen-Graphen **661** hinzugefügt. Dann wird das Optimieren in Schritt **1002** erneut durchgeführt, wobei die Pose des Fixknotens **972** im Rahmen der Optimierung nicht verändert wird.

[0164] Der Fixknoten **972** kann z.B. basierend auf Elementen bestimmt werden, die aus folgender Gruppe ausgewählt sind: die Position des ausgewählten Knotens **971**; mindestens eine Kante **672**, die mit dem ausgewählten Knoten verbunden ist; Absolut-Positionsdaten **605**, **606**, die dem ausgewählten Knoten **971** entsprechen und; Optimierungs-Knoten, mit denen der ausgewählte Knoten **971** direkt verbunden ist (sh. Gleichung 11). Gl. 11 enthält die Terme b_b^{marg} und b_b^{small} . Der erstere wiederum beinhaltet b^{rel} , der aus den Nebenbedingungen der Odometrikanten, die mit dem zu marginalisierenden Knoten verbunden sind, gewonnen wurden. Außerdem enthält er b_a^{full} , der aus den Fixknoten und den Odometrikanten, die mit dem zu entfernenden Knoten verbunden sind, gewonnen wurde. Es wäre auch möglich, dass der Fixknoten **972** basierend auf einem weiteren Fixknoten, der über eine Kante **973** mit dem ausgewählten Knoten **971** verbunden ist, bestimmt wird (vgl. **Fig. 14** und **Fig. 15**).

[0165] Selbstverständlich können die Merkmale der vorab beschriebenen Ausführungsformen und Aspekte der Erfindung miteinander kombiniert werden. Insbesondere können die Merkmale nicht nur in den beschriebenen Kombinationen, sondern auch in anderen Kombinationen oder für sich genommen verwendet werden, ohne das Gebiet der Erfindung zu verlassen.

[0166] Z.B. wurden voranstehend verschiedenste Beispiele in Bezug auf das Erhalten der geschätzten Position aus dem Optimieren des Posen-Graphen beschrieben. Alternativ oder zusätzlich kann es möglich sein, eine geschätzte Orientierung bzw. Odometrie des Kraftfahrzeugs aus dem Optimieren des Posen-Graphen zu erhalten und z.B. im Rahmen des Steuerns der Fahrerassistenzfunktionalität zu berücksichtigen.

[0167] Z.B. wurden voranstehend verschiedenste Beispiele in Bezug auf das Steuern einer Fahrerassistenzfunktionalität für autonomes Fahren beschrieben. Alternativ oder zusätzlich können auch andere Fahrerassistenzfunktionalitäten gesteuert werden, z.B. teil- oder hochautomatisierte Fahrtlösungen, etc.

Bezugszeichenliste

t.1–t.13	Zeitpunkt
1–5	Schritt
101	Absolut-Positioniersystem
102	Absolut-Positioniersystem
111	Odometrie-Positioniersystem
112	Odometrie-Positioniersystem
113	Odometrie-Positioniersystem
121	Schnittstelle
122	Schnittstelle
123	Prozessor
124	Speicher
129	Fahrerassistenz
151	Ortungsfusion
152	Graphenverwaltung
153	Backend, Optimierung
190	Ist-Position
191	Zuverlässigkeit
201	Zeitintervall
202	Abtastrate
203	Unterbrechung
105, 106	Roh-Absolut-Positionsdaten
115, 116	Roh-Odometrie-Positionsdaten
615	Odometrie-Positionsdaten
661	Posen-Graph
662	Interpolation
671	Knoten
672	Kanten
605, 606	Absolut-Positionsdaten
901	Systemmatrix
902, 903	Einträge der Systemmatrix
971	Ausgewählter Knoten
972	Fixknoten
973	Kante
1001–1006	Schritt

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- DE 102013208521 A1 [0002]
- DE 102014211178 A1 [0008]
- DE 102015219577 [0009]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Sibley G. et al., J. Field Robotics 27 (2010) 587–608 [0011]
- Kümmerle, R. et al., g2o2o: A General Framework for Graph Optimization, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011 [0016]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Marginalisieren eines Posen-Graphen (**661**), das umfasst:
 - für jeden von mehreren Zeitpunkten (t.1–t.12): jeweils Ermitteln von Odometrie-Positionsdaten (**615**) einer beweglichen Maschine basierend auf einer Ausgabe mindestens eines Odometrie-Positioniersystems (**111**, **112**),
 - für jeden der mehreren Zeitpunkte (t.1–t.12): jeweils Ermitteln von Absolut-Positionsdaten (**605**, **606**) der Maschine basierend auf einer Ausgabe mindestens eines Absolut-Positioniersystems (**101**, **102**),
 - Erzeugen (**152**) des Posen-Graphen (**661**) mit Kanten (**672**), die den Odometrie-Positionsdaten (**615**) entsprechen, und mit Knoten (**671**, **971**), die den Absolut-Positionsdaten (**605**, **606**) entsprechen,
 - Optimieren (**153**, **1002**) des Posen-Graphen (**661**) zum Erhalten einer geschätzten Position (**190**) der Maschine,**dadurch gekennzeichnet**, dass das Verfahren weiterhin umfasst:
 - nach dem Optimieren (**153**, **1002**): Auswählen eines Knotens (**971**) des Posen-Graphen (**661**),
 - für den ausgewählten Knoten (**971**): Bestimmen eines Fixknotens (**972**) des Posen-Graphen (**661**),
 - Entfernen des ausgewählten Knotens (**971**) aus dem Posen-Graph (**661**).
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Fixknoten (**972**) basierend auf Elementen bestimmt wird, die aus folgender Gruppe ausgewählt sind: die Position des ausgewählten Knotens (**971**); mindestens eine Kante (**672**), die mit dem ausgewählten Knoten (**971**) verbunden ist; Absolut-Positionsdaten (**605**, **606**), die dem ausgewählten Knoten (**971**) entsprechen; und die Position eines weiteren Fixknotens (**972**), der über eine Kante (**973**) mit dem ausgewählten Knoten (**971**) verbunden ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Fixknoten (**972**) ein Schur-Komplement des ausgewählten Knotens (**971**) darstellt.
4. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verfahren weiterhin umfasst:
 - nach dem Entfernen des ausgewählten Knotens: erneutes Optimieren (**153**, **1002**) des Posen-Graphen (**661**) zum Erhalten einer weiteren geschätzten Position (**190**) der Maschine,
 wobei die Position des Fixknotens (**972**) gegenüber dem erneuten Optimieren unveränderlich ist, wobei der Fixknoten (**972**) über eine Kante (**973**) mit einem benachbarten Knoten (**671**) des Posen-Graphen (**661**) verbunden ist.
5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verfahren weiterhin umfasst:
 - vor dem Durchführen des erneuten Optimierens: Anpassen einer Verlustfunktion der Kante (**973**) des Posen-Graphen (**661**), die zwischen dem Fixknoten (**972**) und dem benachbarten Knoten (**671**) verläuft, und / oder Anpassen einer Unsicherheit des Fixknotens (**972**).
6. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass derjenige Knoten (**971**) des Posen-Graphen (**661**) ausgewählt wird, der dem ältesten Zeitpunkt (t.1–t.12) entspricht.
7. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Entfernen des ausgewählten Knotens (**971**) selektiv in Abhängigkeit einer Anzahl von Knoten (**671**, **971**) des Posen-Graphen (**661**) durchgeführt wird.
8. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Maschine ein Kraftfahrzeug ist und dadurch dass das Verfahren weiterhin umfasst:
 - Steuern einer Fahrerassistenzfunktionalität (**129**) basierend auf der geschätzten Position (**190**) des Kraftfahrzeugs.
9. Steuergerät, das umfasst:
 - mindestens eine Schnittstelle (**121**, **122**), die eingerichtet ist, um jeweils Ausgaben von mindestens einem Odometrie-Positioniersystem (**111**, **112**) zu empfangen und um jeweils Ausgaben von mindestens einem Absolut-Positioniersystem (**101**, **102**) zu empfangen,
 - mindestens einen Prozessor (**123**), der eingerichtet ist, um jeweils für jeden von mehreren Zeitpunkten (t.1–t.12) Odometrie-Positionsdaten (**615**) einer Maschine basierend auf den Ausgaben des mindestens einen Odometrie-Positioniersystems (**111**, **112**) zu ermitteln,

wobei der mindestens eine Prozessor (123) weiterhin eingerichtet ist, um jeweils für jeden der mehreren Zeitpunkte (t.1–t.12) Absolut-Positionsdaten (605, 606) der Maschine basierend auf den Ausgaben des mindestens einen Absolut-Positioniersystems (101, 102) zu ermitteln,
wobei der mindestens eine Prozessor (123) weiterhin eingerichtet ist, um einen Posen-Graph (661) zu erzeugen,
wobei Kanten (672) des Posen-Graphs (661) den Odometrie-Positionsdaten (615) entsprechen,
wobei Knoten (671) des Posen-Graphs (661) den Absolut-Positionsdaten (605, 606) entsprechen,
wobei der mindestens eine Prozessor (123) weiterhin eingerichtet ist, um den Posen-Graph (661) zum Erhalten einer geschätzten Position (190) der Maschine zu optimieren (153, 1002),
dadurch gekennzeichnet, dass der mindestens eine Prozessor (123) weiterhin eingerichtet ist, um nach dem Optimieren (153, 1002) einen Knoten (971) des Posen-Graphen (661) auszuwählen, für den ausgewählten Knoten (971) einen Fixknoten (972) des Posen-Graphen (661) zu bestimmen und den ausgewählten Knoten (971) aus dem Posen-Graph (661) zu entfernen.

10. Steuergerät nach Anspruch 9, wobei das Steuergerät eingerichtet ist, um ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1–8 durchzuführen.

Es folgen 12 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

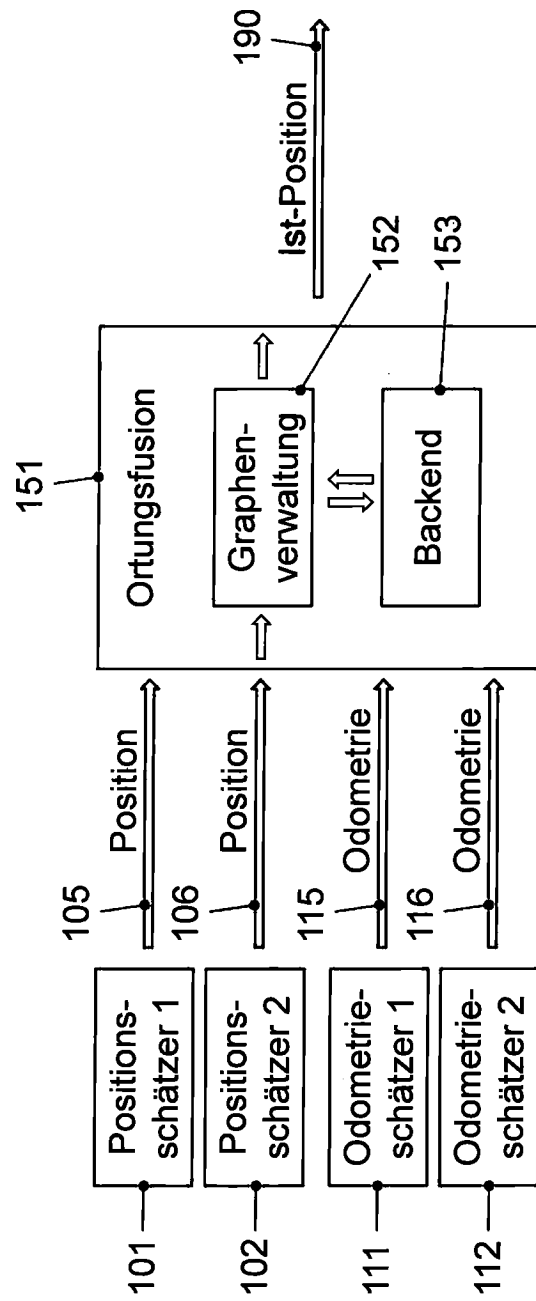


FIG. 1

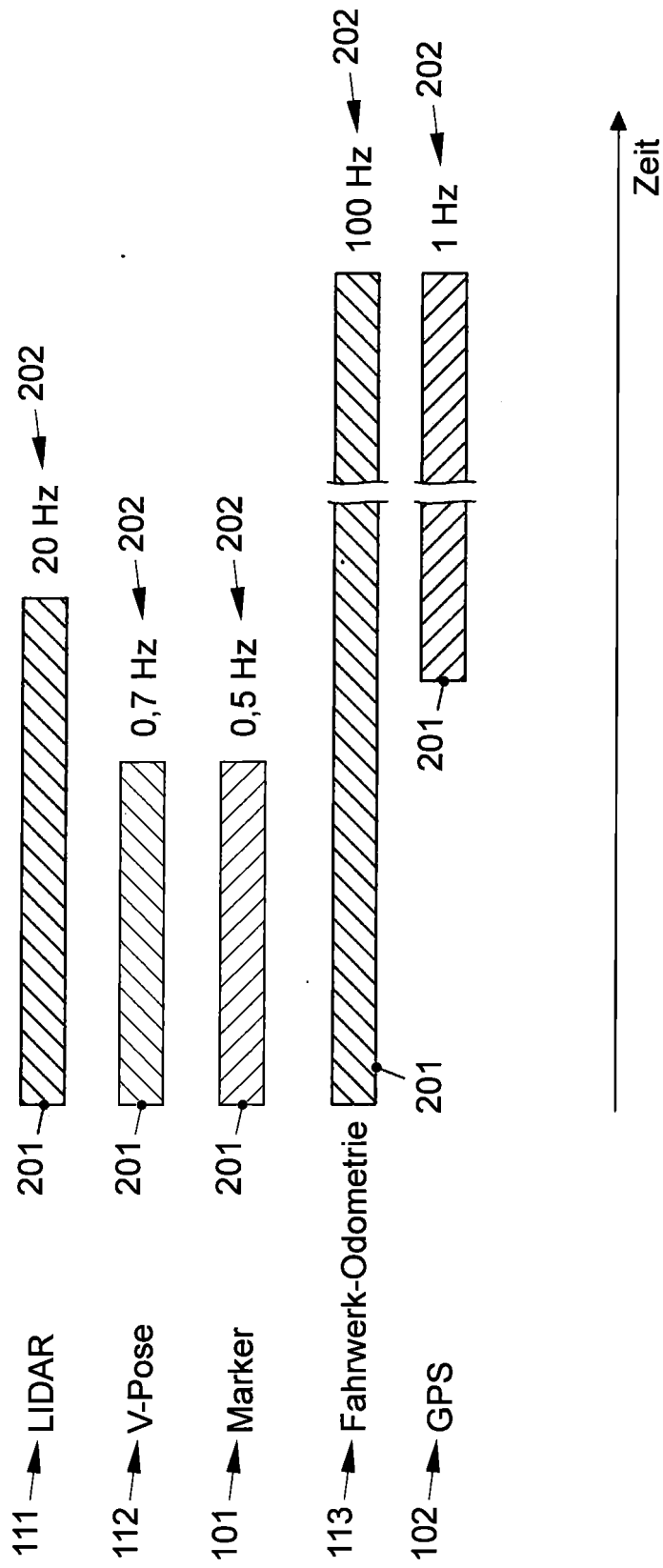


FIG. 2

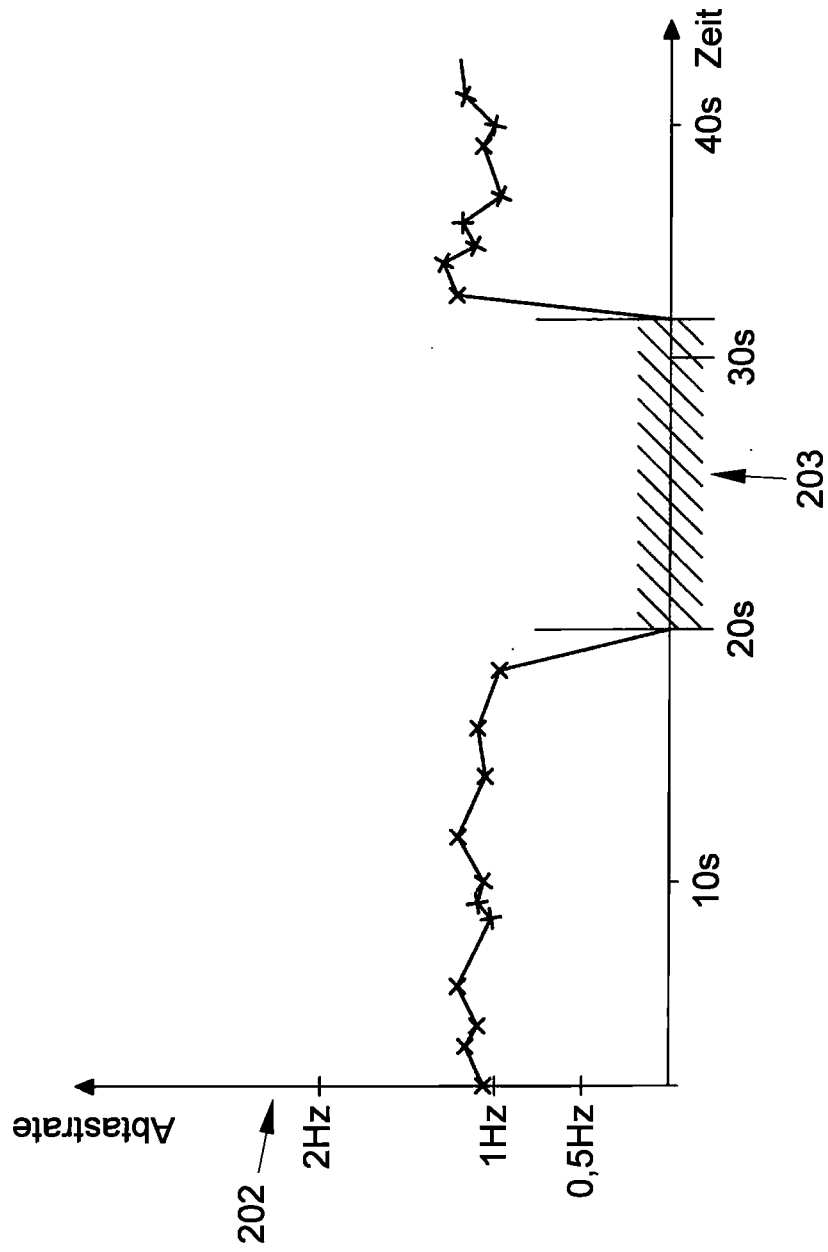


FIG. 3

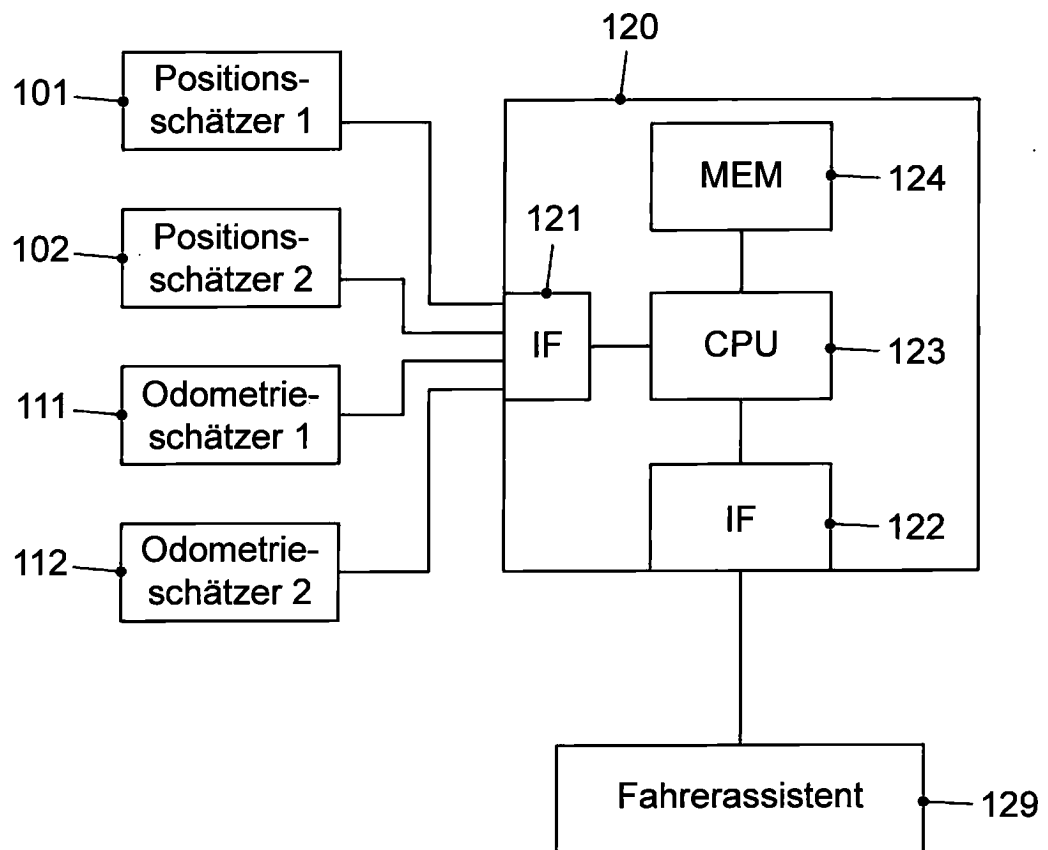


FIG. 4

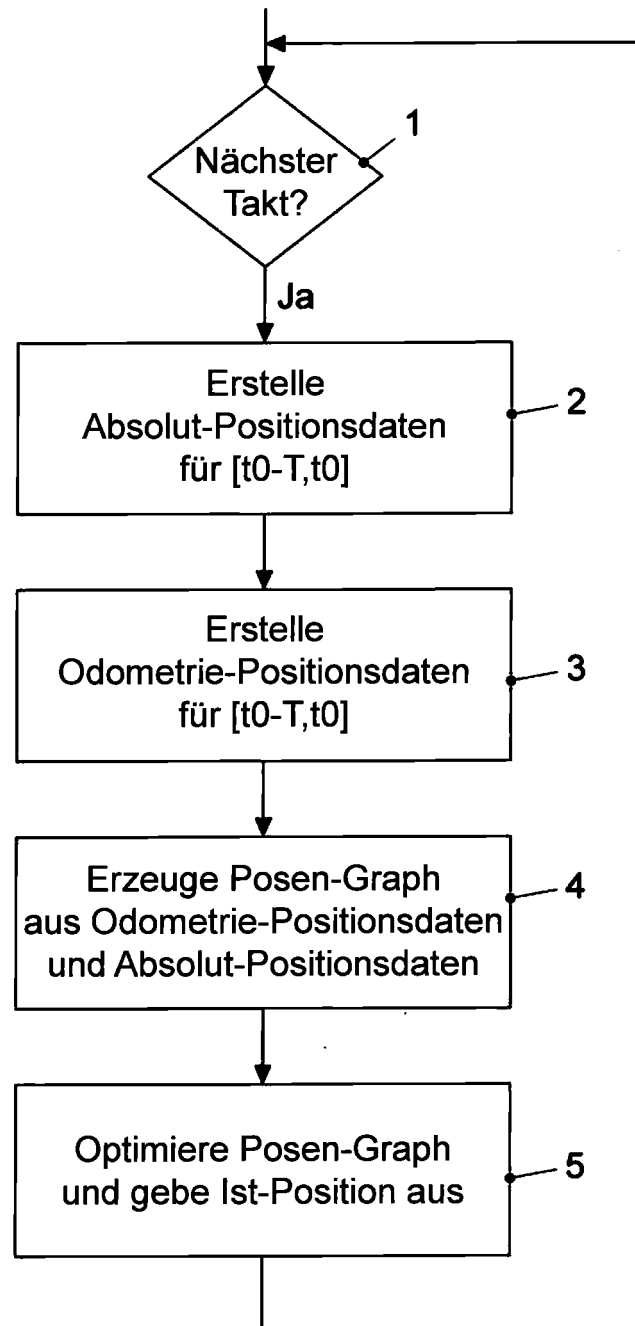


FIG. 5

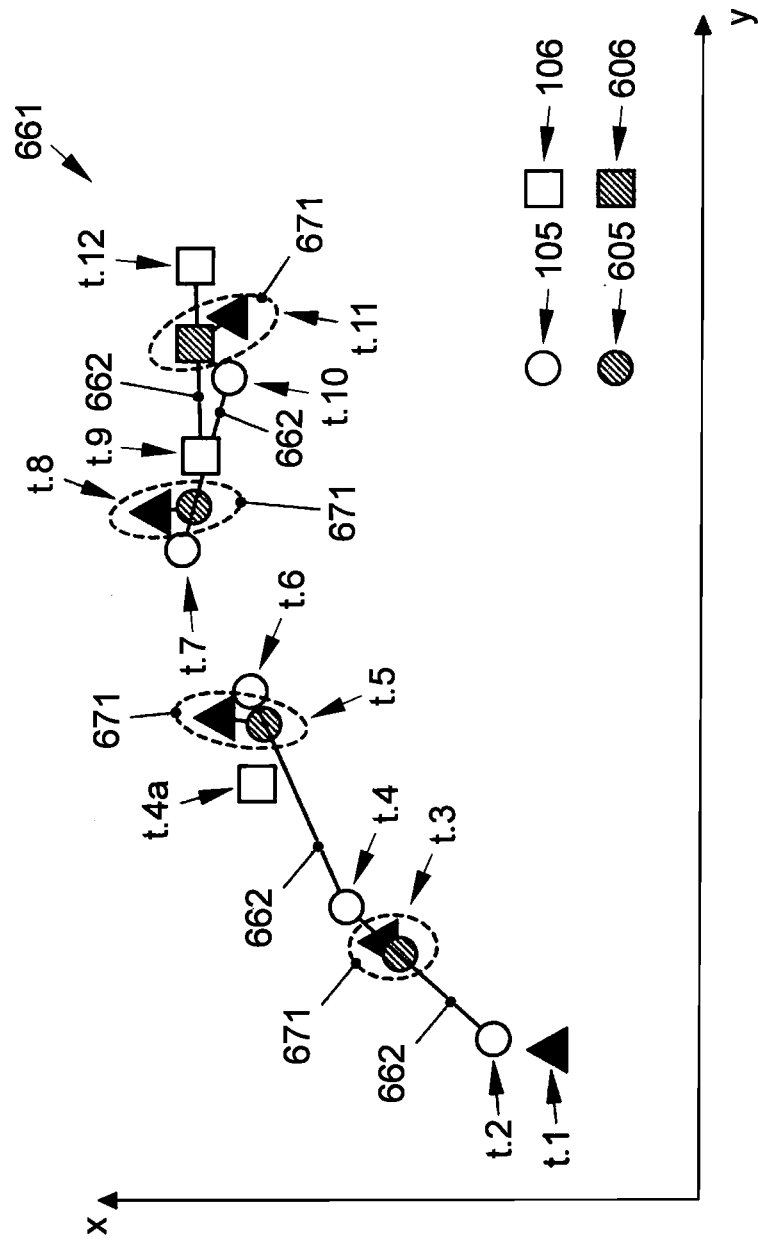


FIG. 6

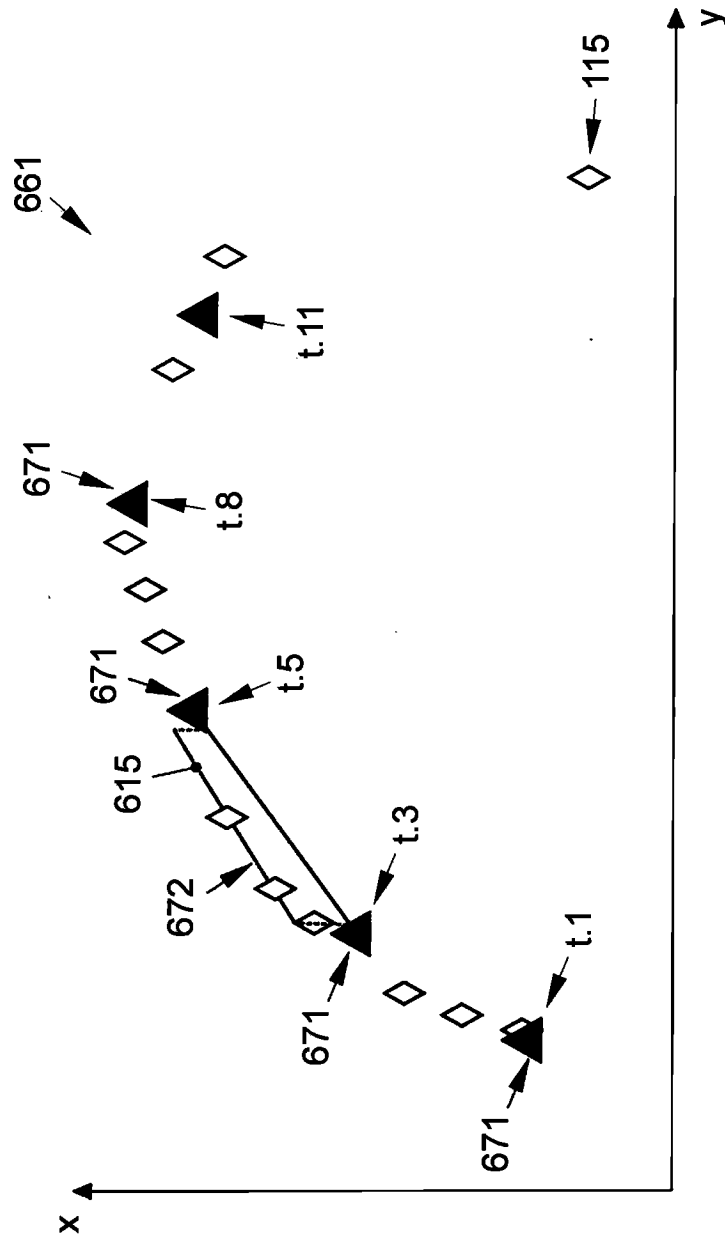


FIG. 7

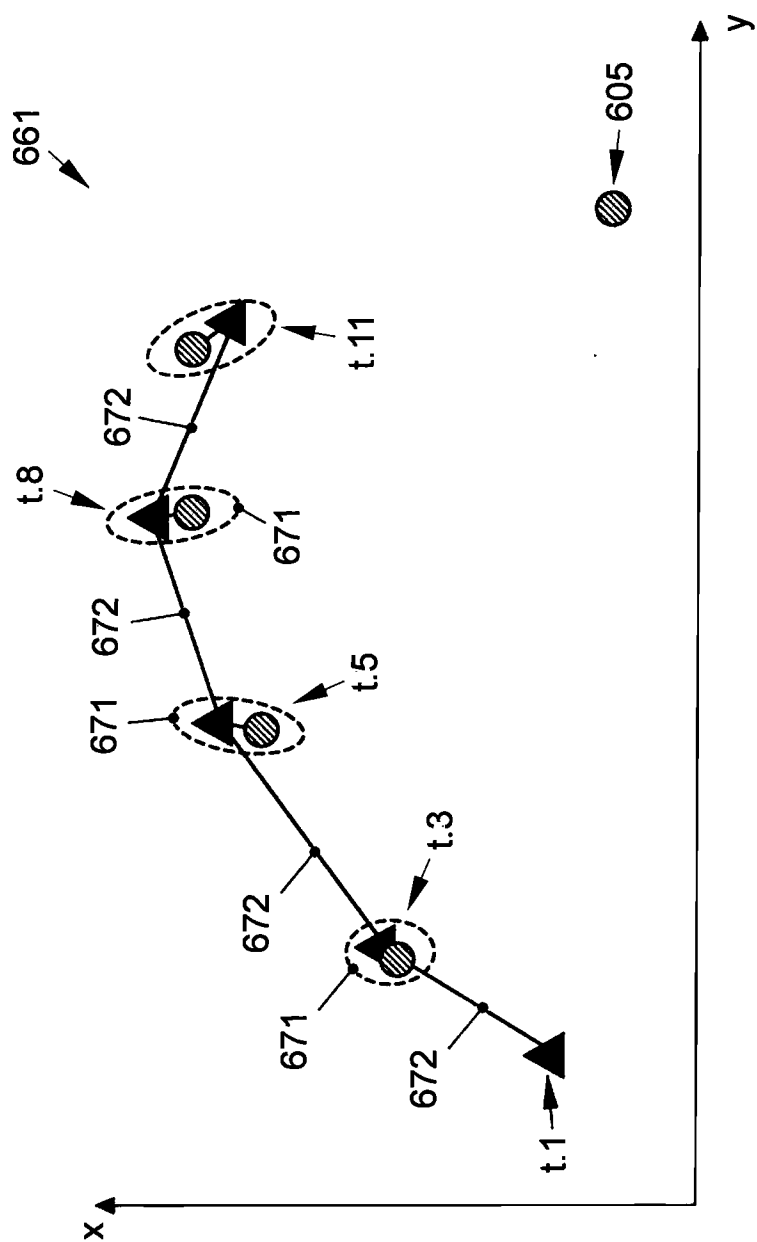


FIG. 8

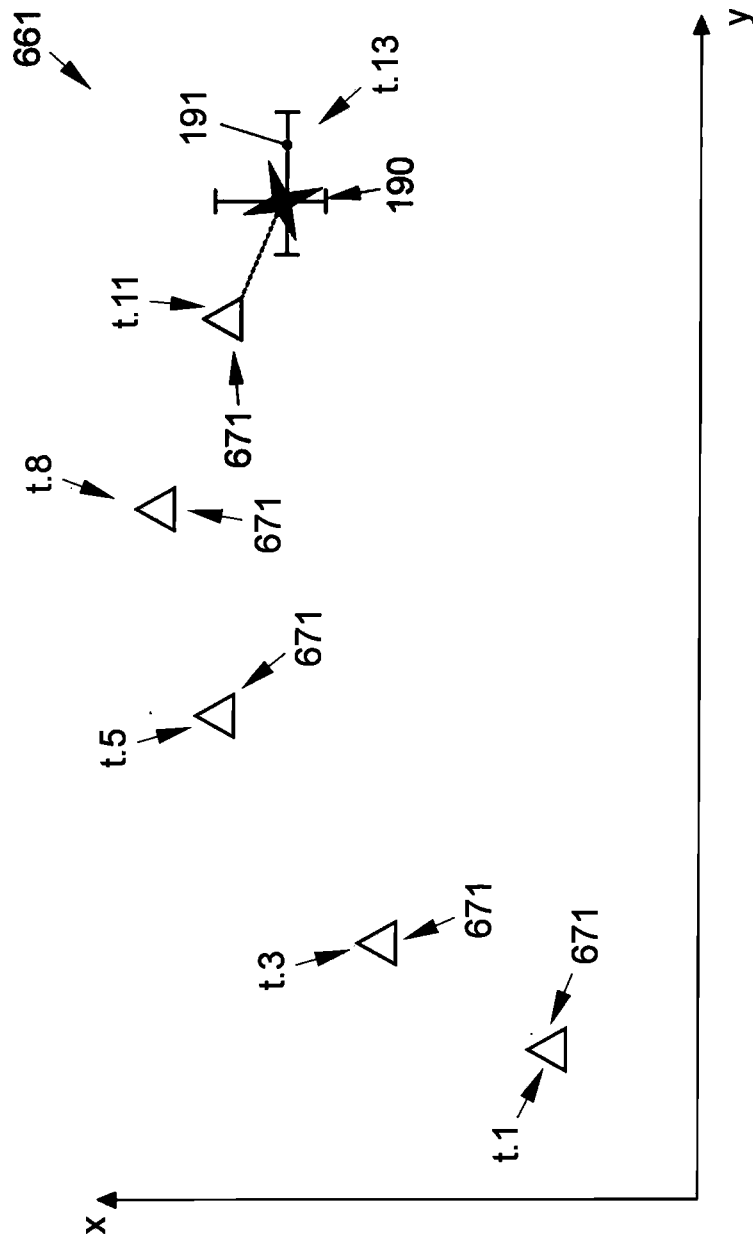


FIG. 9

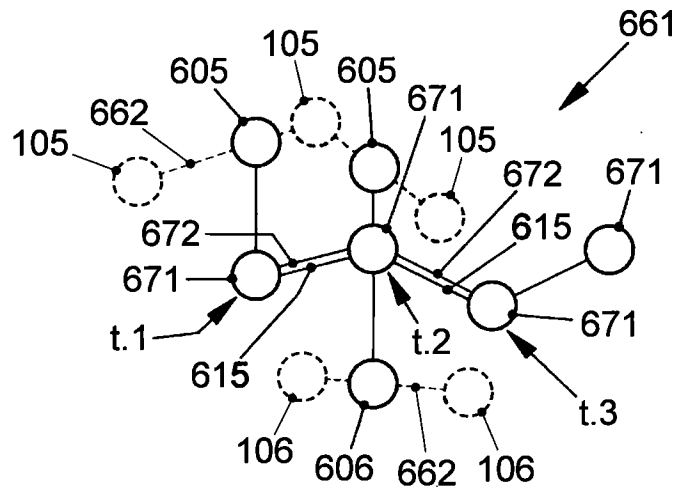


FIG. 10

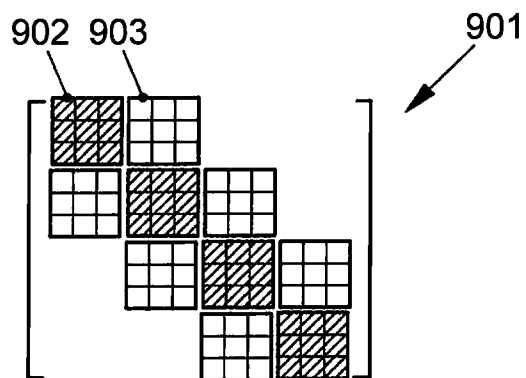


FIG. 11

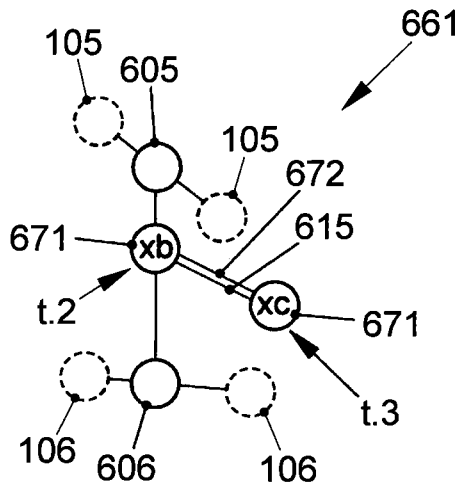


FIG. 12

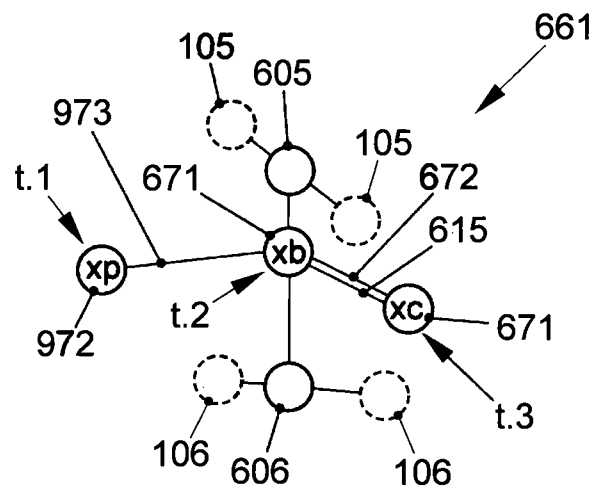


FIG. 14

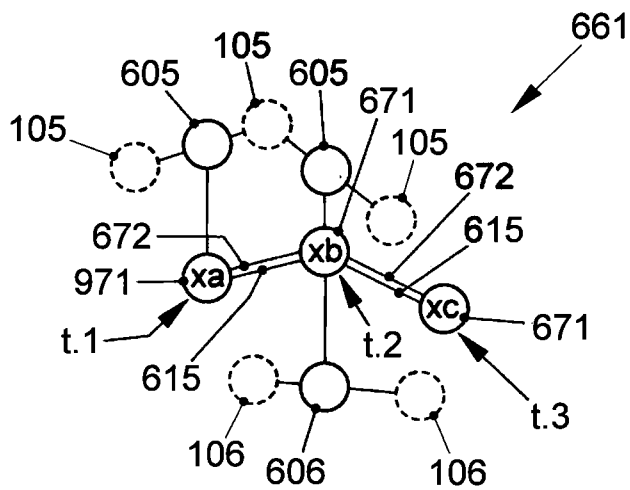


FIG. 13

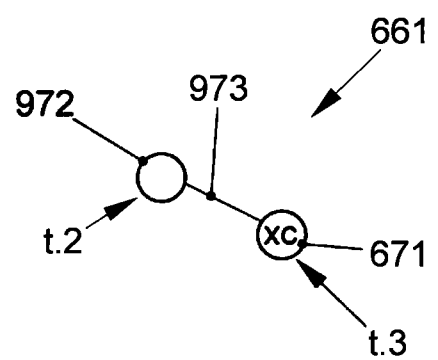


FIG. 15

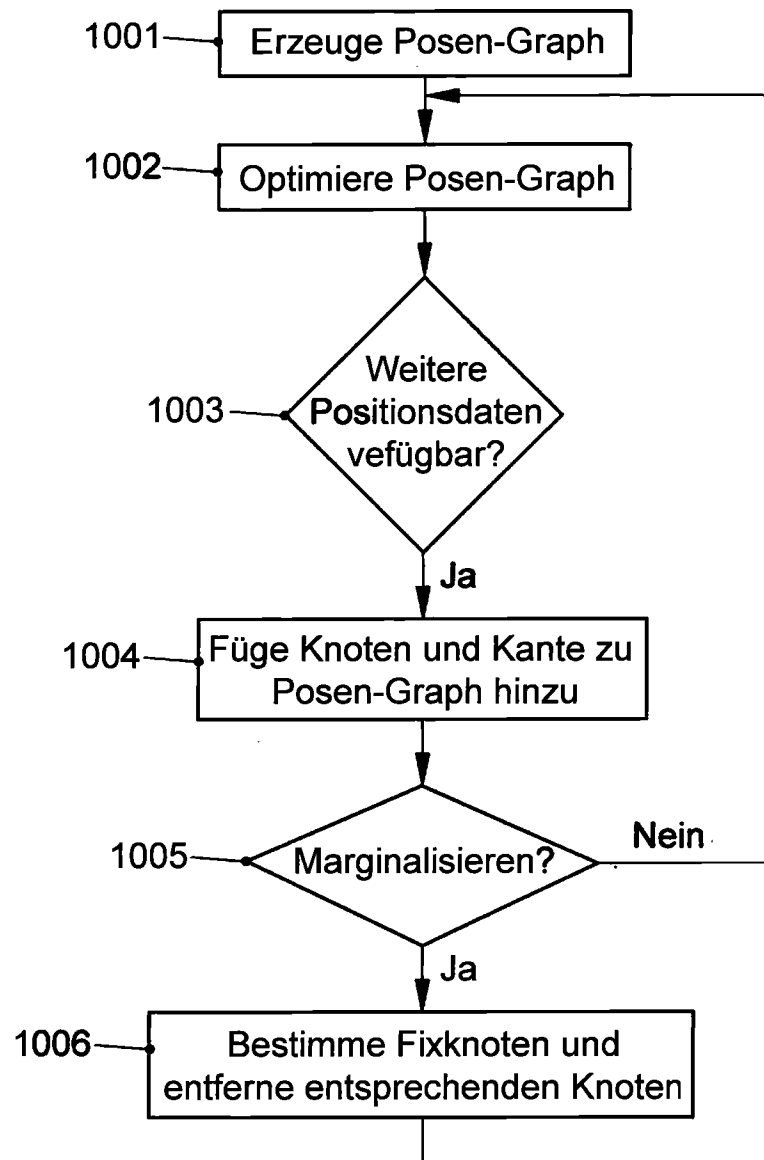


FIG. 16