

STRAPDOWN - EIN TRÄGHEITSNAVIGATIONSKONZEPT FÜR INGENIEURANWENDUNGEN

E.H. KNICKMEYER, K.-P. SCHWARZ, P.J.G. TEUNISSEN

Zusammenfassung

Strapdown-Trägheitsnavigationssysteme erlauben im Vergleich zu Plattformgeräten für Vermessungszwecke zusätzlich den Abgriff von Beschleunigungen, Winkelgeschwindigkeiten und Orientierungsparametern des Gerätegehäuses. Nach einer einführenden Diskussion der Beobachtungsgrößen, der Messprozedur, des Fehlerverhaltens und der Zielgrößen wird eine Klassifizierung von Anwendungsbereichen angegeben. Die direkte Nutzung der Winkelgeschwindigkeiten ist für zwei Beispiele skizziert, die Krümmungsbestimmung von Rohrleitungen und die von Verkehrswegen. Der Artikel schließt mit einer Aufzählung augenblicklicher Trends in der Systementwicklung und dem Versuch, sie im Hinblick auf Ingenieurwendungen zu werten.

Summary

Strapdown inertial navigation systems output accelerations, angular velocities, and attitude parameters of the instrument in addition to those quantities provided also by platform inertial surveying systems. An introductory discussion of the strapdown observables, the measurement procedure, the error behaviour, and the target quantities is followed by a classification of areas of application. Two examples outline the direct use of angular velocities: the determination of the curvature of pipelines and of roads or other ways of traffic. The article concludes with current trends in the field of systems development and an attempt to assess them in the light of engineering applications.

Résumé

Les systèmes inertiels de navigation de type strapdown fournissent, en plus des données accessibles par les plates-formes inertielles, l'accélération, la vitesse angulaire et l'orientation de l'appareil. Une discussion concernant les quantités observables, le procédé de mesure et le comportement des erreurs précède une classification des champs potentiels d'applications. Deux exemples d'utilisation directe de la vitesse angulaire sont présentés, à savoir: La détermination du rayon de courbure de pipe-lines et celle des voies de circulation. L'article se termine par une revue des tendances actuelles touchant le développement de ces systèmes et tente d'évaluer leur potentiel pour les travaux de génie.

1. Einleitung

Inertiale Navigationsgeräte sind seit den 50er Jahren erfolgreich im Einsatz. Ihre Sensoren messen spezifische Kräfte und Winkelgeschwindigkeiten bezüglich des Inertialraums, aus denen Navigationsgrößen in einem nichtinertialen Koordinatensystem abgeleitet werden. Dem jeweiligen Stand der Technik entsprechend sind in den frühen Geräten beide Koordinatensysteme mechanisch realisiert worden. Mit dem Aufkommen elektronischer Rechner wurden die analog ausgeführten Berechnungen schrittweise durch elektronisch-digitale ersetzt. Semianalytische Geräte realisieren nur noch ein Koordinatensystem mechanisch durch eine nachgeführte, kardatisch aufgehängte Plattform, und in analytischen Geräten sind beide Koordinatensysteme nur noch in Form von Zahlen im Rechner vorhanden. Diese Geräte sind unter der Bezeichnung "Strapdown" oder deutsch gehäuseseit bekannt geworden. Sie haben im Vergleich zu semianalytischen Inertialgeräten keine Kardan-Aufhängung, verbrauchen erheblich weniger Energie, sind einfach zu warten, lassen sich leichter verschiedenen Aufgaben anpassen, sind zuverlässiger und erheblich billiger. Zur Zeit erreichen sie allerdings noch nicht die Genauigkeit der besten Plattformgeräte.

Vermessungstauglich gemachte semianalytische Geräte gibt es seit ca. 15 Jahren von den Firmen Litton, Honeywell und Ferranti. Sie sind auf die Positions- und Schwerbestimmung spezialisiert. Die Ausgabe von orientierungsabhängigen Größen ist unterdrückt. An der Universität Calgary wird augenblicklich daran gearbeitet, ein Strapdown-Gerät, bei dem alle interessanten Größen direkt abgegriffen werden können, auf Vermessungsaufgaben anzuwenden. Dabei haben sich interessante Perspektiven ergeben, die in den folgenden Kapiteln aus dem Konzept der trägergeresten Sensoren entwickelt werden. Besondere Beachtung findet die gleichwertige Behandlung von orientierungsabhängigen Größen, die von Vermessern meist etwas stiefmütterlich behandelt werden. Im Prinzip sind Winkelgeschwindigkeiten auch von semianalytischen Geräten als Abgriff der Plattformstabilisierenden Drehmomente erhältlich. Die analog-zu-digital Wandlung dieser Größen ist jedoch von unbefriedigender Genauigkeit.

In der Ingenieurgeodäsie wurden und werden einzelne Sensoren für unterschiedlichste Aufgaben eingesetzt. Solche Strapdown-Anwendungen sind Sonderfälle der hier behandelten. Am bekanntesten ist die Nutzung eines Kreisel als Kompass, insbesondere unter Tage /12/. Eine intelligente Kombination von dreizahlvariablen Kreiseln und Pendel wurde zur analogen, kontinuierlichen Überhöhungsbestimmung von Schienen eingesetzt /05/. Moderne Beschleunigungsmesser dienen in Verbindung mit Fourier- und Modalanalysen der Bestimmung von Schwingungsvorgängen, z.B. bei Brücken /06/. Solche und andere Aufgaben können grundsätzlich zusätzlich zu den geodätischen Standardaufgaben Positionierung und Schwerfeldbestimmung mit Inertialgeräten gelöst werden. Sie sind damit Universalgeräte im weitesten Sinne. Einschätzungen resultieren nur aus dem Fehlerverhalten der Sensoren und des Gesamtsystems und aus der Maßprozedur. Ausführlichere all-

gemeine Einführungen in Strapdown-Systeme und ihre Navigationsanwendungen sind in /01/ enthalten. Vermessungsanwendungen werden in /02/, /08/ behandelt.

2. Strapdown-Konzept

2.1 Beobachtungsgrößen, Kalibrierung

Das Kernstück eines Strapdown-Inertialgerätes ist der Sensorblock, der drei Beschleunigungsmesser und drei Winkelgeschwindigkeitsmesser enthält, umgeben von Schaltern, Anzeige, Energieversorgung, Elektronik und Steckdosen. Das Gehäuse, in dem diese Teile untergebracht sind, realisiert das sensorfeste Koordinatensystem b . Sein Ursprung liegt nicht, wie manchmal behauptet wird, im Ursprung der Kreiselachsen, sondern nahe den Beschleunigungsmesserpuffmassen, die nur wenige mm auseinander liegen. Die Achsen der Sensoren sind genähert parallel zu den Gehäuseachsen ausgerichtet. Die beobachteten Größen sind spezifische Kraft f und Winkelgeschwindigkeit w . f setzt sich zusammen aus inertialer und Gravitationsbeschleunigung. Erstere enthält für Berechnungen in einem erdfesten Koordinatensystem Coriolis- und Zentrifugalbeschleunigung. Gravitations- und Zentrifugalbeschleunigung werden in praktischen Berechnungen zusammengefaßt zur Schwere g . w ist die Winkelgeschwindigkeit von b bezüglich eines beliebigen inertialen Koordinatensystems l , gemessen in Richtung der Winkelgeschwindigkeitsmessersachsen. f und w sind zu berichtigen wegen Nullpunkt-, Maßstab- und Ausrichtefehlern bzgl. b , die temperaturabhängig sind. Diese Fehler sind statischer Natur. Kompensiert werden ebenfalls dynamische Fehler wie Abhängigkeiten von w von f und unerwünschte Einflüsse von Vibrationen. Außerdem können Filter installiert sein, die stochastische Anteile der Meßgrößen vermindern. Als Ergebnis der Kompensation stehen f_b und w_b im System b der Gehäuseachsen zur Verfügung.

Die Erstellung des Kompensationsmodells geschieht durch die Kalibration. In kontrollierter Umgebung, z.B. auf einem Mehrachsendrehtisch, werden die $o.a.$ Fehler möglichst einzeln angeordnet und in Modellparameter, z.B. Koeffizienten einer Reihenentwicklung für die Temperaturabhängigkeit des f_x -Nullpunktfehlers umgerechnet. Fehler in f werden statisch bestimmt, Fehler in w_b können nur durch Rotationen angeregt werden mit Ausnahme des Nullpunktfehlers. Ausgeklügelte Meßprozeduren oder externe Zusatzinformationen erlauben die Bestimmung von einigen dieser Fehler auch während der Messung.

Aus der Sicht der digitalen Weiterverarbeitung der Daten ist es wünschenswert, nicht analog-kontinuierlich zu beobachten, sondern digital zu diskreten Epochen. Dem ist in fast allen modernen Geräten entsprechend durch integrierende Sensoren, die je nach Umgebung und Einsatzzweck in Intervallen von ca. 1 bis 10^{-4} sec ausgelesen werden (Beschleunigungsmesser für Vibrationsuntersuchungen bis 10^{-8} sec). Das Ergebnis sind dann Ge-

Schwindigkeits- und Winkelinkremente; erstere enthalten noch den Gravitationseinfluss.

Fazit. Die Sensoren nehmen Größen wahr, die die 6 geometrischen Freiheitsgrade der Bewegung des Gehäuses im inertialen Raum unmittelbar enthalten. Diese und abgeleitete Größen stehen dem Nutzer eines Strapdown-Gerätes direkt zur Verfügung. Die Art der Verwertung ist völlig dem Nutzer überlassen und kann für verschiedene Anwendungen maßgeschneidert werden. Dabei ist ein Standardalgorithmus nützlich, mit dem die zweifache Integration von f_b und die einfache von w^{p1b} ausgeführt wird und der bereits eine Reihe von Zielparametern direkt liefert. Abb. 1 zeigt ein entsprechendes Blockdiagramm, bei dem als nichtinertiales Koordinatensystem das horizontal-nordorientierte 1 gewählt wurde. Zur Ableitung und Beschreibung solcher Algorithmen siehe z.B. /01,04/. f_b und w^{p1b} oder ihre Integrale über kurze Zeiträume haben naturgemäß bzgl. der 6 Freiheitsgrade, oder der Trajektorie $r^e(t)$ und der Orientierung des Gehäuses $R_{1D}^b(t)$ einen sehr lokalen Charakter, weil sie zeitliche Ableitungen dieser Größen darstellen. Aus diesem Umstand läßt sich direkt schließen, daß Langzeitintegrationen fehlersammelnd und ungenau sind, während die Stärke dieser Meßmethode in der Ableitung von lokalen oder Kurzzeit-Größen liegt. In Kap. 2.3 wird etwas genauer auf das Fehlerverhalten von Inertialsystemen eingegangen.

2.2. Meßprozedur

Die Meßprozedur gliedert sich in zwei Schritte, die Initialisierung auf einem Anfangspunkt und die folgende Meßphase, bei der das Gerät entlang einer Trajektorie bewegt wird.

Die Initialisierung kann ohne zusätzliche Information erfolgen und benutzt dann Erdrinkelgeschwindigkeitsvektor w^{p1e} und Schwervektor g_b im Anfangspunkt, um die Orientierung des Gehäuses und seinen Ort in einem erdfesten Koordinatensystem zu bestimmen. Diese Prozedur wird Selbstausrichtung genannt. Nacheinander werden die Horizontalebene in b mit Hilfe von g_b , und Osten innerhalb dieser Ebene mit Hilfe von w^{p1e} bestimmt. Die Horizontalkomponenten von g und die Ostkomponente von w^{p1e} sind Null. Falls die Orientierung des Gehäuses auf andere Weise bestimmt wird, z.B. durch mechanische oder optische Verbindung zum erdfesten Koordinatensystem e oder zu einem bekannten lokalen System l im Anfangspunkt, kann die zeitraubende (10min bis ca. 1h) Standlaufmessung entfallen. In der Praxis wird meist eine gestützte Ausrichtung durchgeführt, bei der Teile der Orientierung und Ort beschreibenden Parameter, z.B. Breite, Höhe und Azimut, dem Ausrichtungs-Algorithmus als bekannt zugeführt werden. Dies ist sinnvoll, da bzgl. der Sensorgenauigkeit g ein starkes, wie jedoch ein schwaches Signal ist, d.h. die Horizontalebene ist in b gut bestimmt, alle von w^{p1e} abhängigen Größen jedoch nicht. Zu letzteren zählen Breite ϕ und Azimut A , wie die hier nicht abgeleiteten Beziehungen zeigen mögen:

$$\phi = \arccos(\langle g^b, w^{p1e} \rangle / (|g^b| \cdot |w^{p1e}|)) - \pi/2, \quad \langle \dots \rangle \dots \text{Skalarprodukt}$$

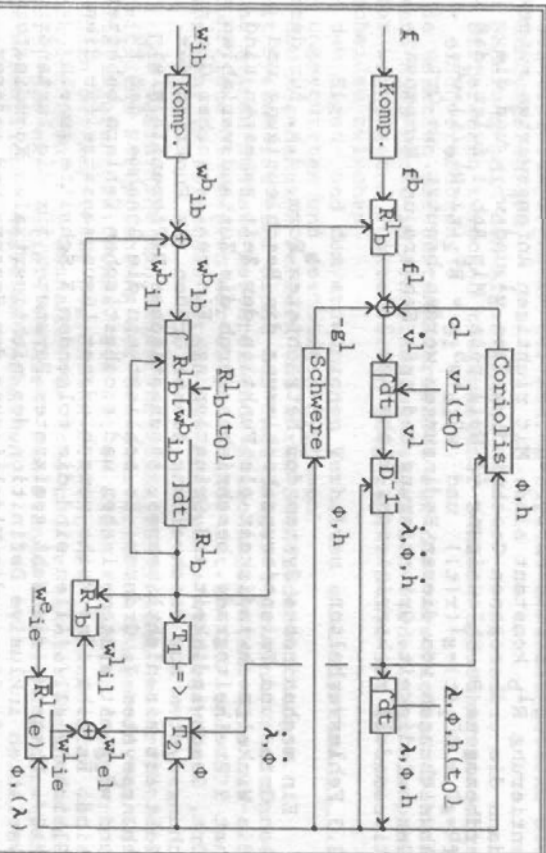


Abbildung 1: Blockschaltbild zum Standardalgorithmus. Alle angegebenen Größen stehen beim Strapdowngerät zur Verfügung. Erläuterungen:

- f_b Koordinaten der spezifischen Kraft in b
 - w^{p1e} Winkelgeschwindigkeit von e bzgl. l in l
 - R^l_b Rotationsmatrix von b nach l
 - A, ϕ, h Länge, Breite, Höhe
 - $T_1 : R^l_b \Rightarrow \text{Roll-, Nick-, Gierwinkel}$
 - $T_2(\phi) : (\dot{\lambda}, \dot{\phi}) \Rightarrow w^{p1e}$
 - $D(\phi, h) : (\dot{\lambda}, \dot{\phi}, \dot{h}) \Rightarrow v_1$
- Koordinatensysteme:
- b gehäusefest; Achsen rechts, vorn, oben;
 - l Ursprung nahe Beschleunigungsmesserrüfmassemittelpt lokal; Achsen Ost, Nord, Zenit; Ursprung wie b
 - e erdfest; CIO-Greenwich-orientiert; Ursprg. Erdmittelpkt
 - l inertial; CIO-Frühlingspunkt-orientiert
 - f Frenet; Achsen Tangente, Haupt-, Binormale; Ursrg. wie b

$$A = \arctan((-g_z^b \cdot w_x^{p1e} + g_x^b \cdot w_z^b) / (-g_y^b \cdot |w^{p1e}| \cdot \sin\phi + |g^b \cdot w_y^{p1e}|))$$

Während der Meßphase werden die Meßwerte und abgeleitete Größen, wie Koordinaten der Trajektorie und Orientierung des Gehäuses, einer internen Uhr zugeordnet. Um das Anwachsen der Fehler zu begrenzen, siehe Kap. 2.3, müssen der internen Uhr regelmäßig bekannte Größen zugeordnet werden. Steht solche geräteexterne Information nicht zur Verfügung, so ist die billigste, wenn auch nicht unbedingt bequemste Methode, die Meßphase zu modifizieren. Das Gerät wird alle paar Minuten für ungefähr 20 Sekunden in eine beliebige erdfeste Ruhelage gebracht (ZUPF).

