

Инерциални сензори и инерциални навигационни системи

Кирил Алексиев

Увод

Инерциалните сензори и инерциалните навигационни системи се базират на основните принципи на динамиката, дял от механиката, в който се определя връзката между действащите върху едно тяло сили и неговото движение. Тези принципи не могат да бъдат доказани непосредствено. Те са следствие на продължителен житейски опит и тяхната валидност се потвърждава от многобройни експериментални проверки. Формулирани са от английския физик Исак Нютон през 1687 г. в неговата книга „Математически принципи на натурфилософията“. Първият принцип на Нютон гласи, че всяка материална точка (тяло) запазва състоянието си на покой или праволинейно равномерно движение дотогава, докато някакво външно въздействие не я изведе от това състояние. Общото свойство на телата да запазват състоянието си на покой или праволинейно равномерно движение при отсъствие на външни въздействия се нарича инертност. Затова, ако едно тяло се движи без външно въздействие казваме, че то се движи по инерция. Ето защо първият принцип на Нютон е известен още като принцип за инерцията. Всички отправни координатни системи, които се движат праволинейно и равномерно спрямо дадена инерциална отправна система, са също инерциални системи. Отправната система, която е свързана с повърхността на Земята, не е строго инерциална поради денонощното въртене на Земята. Тъй като това движение е много бавно, в някои случаи ефектите от него могат да се пренебрегнат и с известно приближение тази система може също да се разглежда като инерциална.

От първия принцип на Нютон следва, че за да се промени големината и посоката на скоростта на дадено тяло, то трябва да изпита някакво външно въздействие. Прието е всяка причина за изменение скоростта на дадено тяло да се нарича сила. В резултат на това тялото променя скоростта си, т.е. придобива ускорение. Ускорителното движение на тялото е проява на някакво ново качество, различаващо се съществено от състоянието на покой или праволинейно равномерно движение. Опитът е показал, че когато на едно и също тяло се действа с различни по големина сили, ускоренията, които то придобива, са пропорционални на големините на силите. Оказва се обаче, че ако с една и съща сила се действа на различни тела, скоростта им на движение се изменя по различен начин, т.е. те придобиват различни ускорения. Следователно резултатът от действието на силата зависи не само от самата сила, а и от някаква характеристика, специфична за всяко тяло. Тази характеристика е наречена маса и е скаларна физична величина, която се въвежда в класическата механика като количествена мярка за инертността на телата. Експериментите показват, че колкото е по-голяма масата на тялото, толкова по-малко ускорение получава то. Вторият принцип на Нютон определя връзката между сила, маса и ускорение. Той гласи, че ускорението, което получава дадено тяло, е пропорционално на силата, която му действа и е обратно пропорционално на масата на тялото.

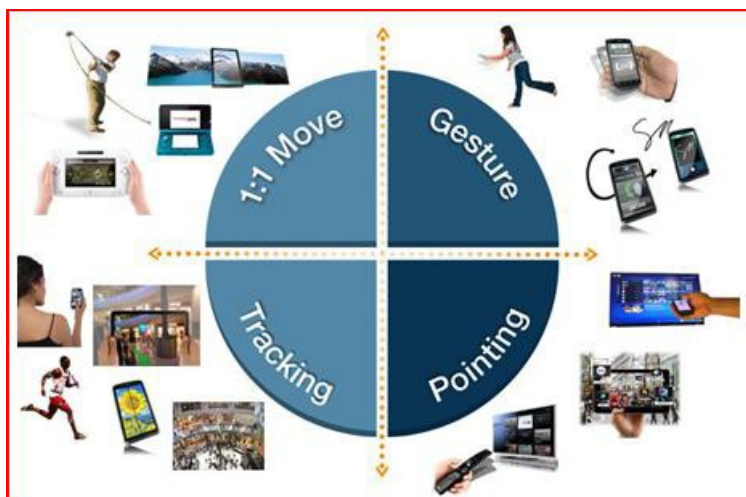
Инерциалните сензори (наричани още инерционни) представляват измерватели на придобитите ускорения на движещо се тяло. Поради пряката връзка от втория принцип на Нютон, често пъти те се считат за измерватели на силите, действащи на тялото.

Областта на инерциалните сензори и инерциалната навигация възниква и започва своето развитие с началото на активното корабоплаване и развитието на математиката през 17-18 в. За един от теоретическите родоначалниците се счита великият математик Ойлер, който

в своя труд „Теория движения твердых тел”, написан по времето на работата му в Руската академия на науките – 1765 г., за първи път се опитва да даде отговор за устойчивото поведение на пумпала при неговото завъртане. Французинът Леон Фуко изобретява жироскопа и прави опит за практическа реализация през 1852 г. Малко по-късно, през 1886 г., друг французин - Флерие изобретява секстант с изкуствен хоризонт. Тези устройства, обаче, поради ниското ниво на техническата реализация, не могат да дадат задоволителни резултати и не намират практическа употреба. Едва в 1909 г. е реализиран в Германия първият жирокомпас, с който започват да се оборудват военните кораби. Истинското развитие на инерциалните сензори започва с развитието на ракетната техника през 30-те години на 20 век от небезизвестните Роберт Годард и Вернер фон Браун. Първата инерциална навигационна система, състояща се от два жироскопа и един акселерометър насочва Фау-2 към английските градове (1942 г.). Тази технология се доразвива след войната в Drapers Labs в Америка, където се създават прецизни инерциални навигационни системи. Инерциалната навигация създава възможност за развитието на космическата програма „Аполо”, подводна навигация и др. Днес почти няма плавателен съд или самолет без инерциална навигационна система.

До 70-те години на миналия век инерциалните системи са били съставени почти изключително от високоточни механични жирокопи (измерватели на скорости на въртене) и акселерометри (измерватели на ускорения). Тези системи се отличават със сложна и високоточна механика и имат изключително висока стойност. Това им отрежда място само в ракетната и космическата индустрии и военните приложения. През 70-те години се появяват оптични жирокопи (fiber optic gyroscope) с използване на лазери и интерферометрия (ring laser gyroscope и interferometric fiber optic gyroscope). Тези жирокопи повишават съществено прецизността на навигационните системи, но стойността им се запазва много висока. С развитието на микроелектромеханичните системи (MicroElectroMechanical System - MEMS) през последните двадесет години цената на инерциалните сензори драстично намалява, но ниската точност на MEMS ограничава възможните им приложения. Постепенно с годините MEMS стават конкурентоспособни на механичните инерциални системи, като по отношение на размер, надеждност, консумация на енергия и цена, превишат многократно другите системи.

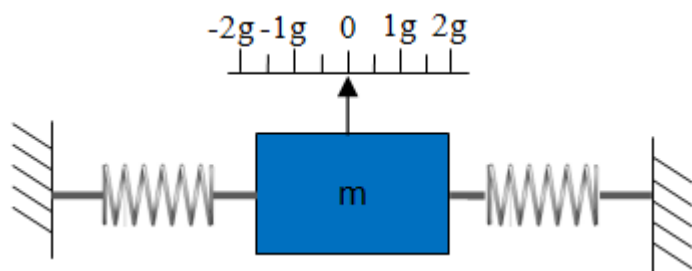
Днес, инерциалните навигационни системи се радват на изключителен интерес и намират широко приложение както за разработка на инерциални навигационни системи, така също и за насочващи системи, в автомобилостроенето, спорта, медицината и много други области (Фиг.1) за измерване на движение и управление с жестове, траекторна обработка, целеуказване и др. Отношенията в цени и точностни характеристики на висококачествените инерциални системи и тези от нисък клас достигат до 10^6 , което налага много внимателен избор на сензори за решаване на конкретните практически проблеми.



Фиг. 1 Приложение на инерциални сензори

Инерциални сензори

Инерциалните сензорни системи включват задължително един или повече жирокопа и един или повече акселерометъра. Броят на сензорите се определя от степените на свобода на движение на динамичната система. За определяне на позицията и ориентацията в 3D пространството се изисква наличието на 3 жирокопа и 3 акселерометъра. Методът за определяне на позицията на тялото на базата на получаваните данни от акселерометрите и жирокопите и без комуникация с външни устройства или ползване на външни ориентири, е известен под името „dead reckoning”. Акселерометрите са разположени така, че техните оси на измерване да са ортогонални една на друга. Жирокопите са разположени по аналогичен начин, измервайки промяната на ориентацията на осите на акселерометрите в пространството. Принципът на действие на акселерометъра е показан на фиг. 2. Устройството на жирокопа е значително по-сложно. В класическия си вид представлява симетрично твърдо тяло, най-често диск, който се върти с голяма ъглова скорост около оста си на симетрия. Основното му свойство е, че оста му се стреми да запази първоначалното си направление в пространството. Това свойство се използва и в навигационните системи. На фиг. 3 е показан класически жирокоп с три степени на свобода.



Фиг. 2 Принцип на действие на акселерометър

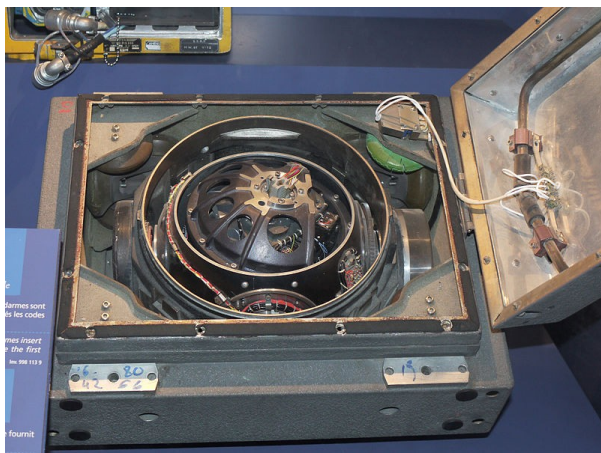


Фиг. 3 Класически жирокоп с три степени на свобода

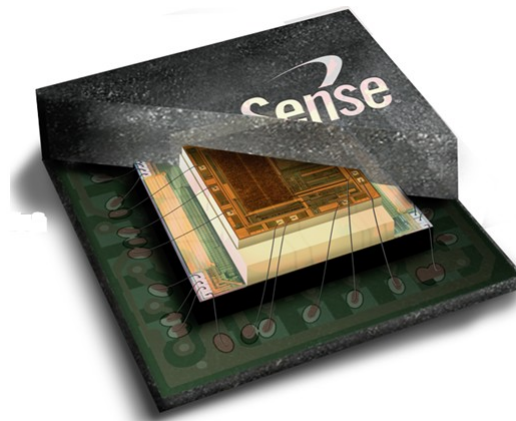
При реализацията на съвременните навигационни системи се използват две основни конструктивни схеми – платформена и безплатформена. Платформената навигационна

система се състои от жirosкоп, използван за запазване на една и съща ориентация в пространството, независимо от динамиката и ориентацията на движещата се система и акселерометри, измерващи ускоренията в тази константна координатна система (фиг. 4). Този клас навигационни системи се отличават с висока прецизност на работа, голямо тегло, консумация на енергия и висока цена. Втората схема на реализация на навигационните системи се нарича безплатформена, поради отсъствието на собствена константна координатна система на сензорите. Те са привързани неподвижно към движещата се система и жirosкопите отчитат скоростите на въртене спрямо тяхното мигновено положение, а акселерометрите - съответните ускорения в конкретната ориентация на движещата се система. Тази схема се реализира най-често като MEMS, характеризира се със значително по-високи погрешности, но реализацията е нискостойностна, с консумация на енергия от порядъка на мили- и микроампери, тегло достигащо под 1g (фиг. 5). Тези характеристики определят възможността за разработка на приложения в почти всички електронни устройства в бита, медицината, спорта, комуникациите и др.

Съвременните инерциални системи често се доокомплектоват и с допълнителни сензори, увеличаващи прецизността на системата като цяло, или разширяващи нейните възможности. Един такъв сензор е магнитометъра (цифровия компас). Тези сензори измерват силата и посоката на магнитните полета. В навигационните системи резултатите от магнитометрите се използват за преобразуване на векторите на ускорението и скоростта на движещата се система в географската координатна система на Земята. В навигационните системи жirosкопите показват само относителни измервания за ориентацията на подвижната платформа а магнитометрите предоставят абсолютни измервания. Страничен полезен ефект е използването на магнитометрите за откриване на метали. Магнитометрите са чувствителни към наличието на магнитни материали или магнитни полета в близост до тях и това може значително да влоши точността на тяхната работа. Друг допълнителен сензор е барометърът. Той служи за измерване на атмосферното налягане. Поради промяна на атмосферното налягане във височина, барометърът обикновено се използва за определяне на височината, на която се намира обекта. Барометрите са чувствителни към промяна на атмосферното налягане и към акустични вълни. Термометърът също участва в съвременните навигационни системи. Високата прецизност на измерванията изисква компенсация на промените в сензорите, настъпващи с изменение на температурата. Затова термосензорът е задължително устройство в съвременните навигационни системи.



Фиг. 4 Класическа навигационна система от френската балистична ракета S3



Фиг. 5 MEMS MPU-9150 на InvenSense с 3D жирокоп, акселерометър, гравитометър (компас), компютър и алгоритми; размери 4x4x1мм

Определяне на координатите и ориентацията на движещо се тяло с инерциални сензори

За описание на движението на тялото в инерциалната координатна система се използва следното уравнение: $\vec{r}_3(t) = \vec{g} + \vec{a}_3(t)$, където \vec{g} е ускорението в инерциалната система, причинено от гравитацията и $\vec{a}_3(t)$ е векторът на ускоренията на действащите на тялото сили, приведен в инерциалната координатна система [2]. Навигационните координати и ориентацията се получават посредством интегриране в инерциалната координатна система:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \iint_0^t (\vec{g} + \vec{a}_3(t)) dt dt$$

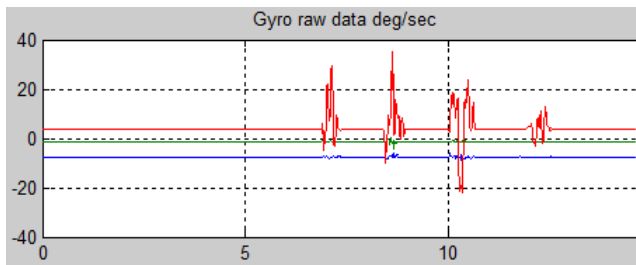
и

$$\vec{\vartheta} = \vec{\vartheta}_0 + \int_0^t \vec{\omega}_3 dt .$$

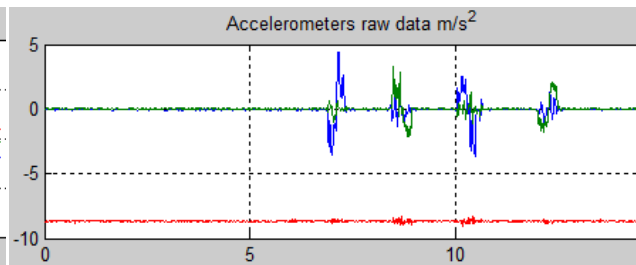
В горното уравнение се предполага, че гравитационното ускорение е постоянно в периметъра на движение на тялото.

За окончателното намиране на координатите и ориентацията на тялото в пространството е необходимо определяне на зависимостта между съответните скорости и ускорения в двете координатни системи. Това може да се извърши чрез използване на Ойлерови ъгли, направляващи косинуси или куатерниони.

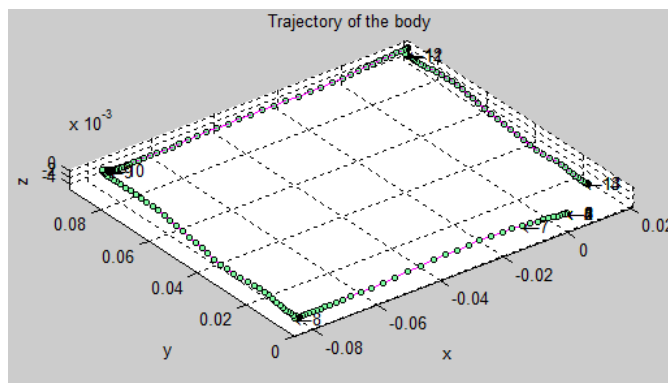
На фиг. 6 и 7 са показани сигналите от 3 жирокопа и 3 акселерометъра при движение на платформа в една равнина по траектория с форма на квадрат. Сигналите са получени през 0.01s. На фиг. 8 е показана реконструирана траектория на движение.



Фиг. 6. Сигнал от жирокопи



Фиг. 7. Сигнал от акселерометри



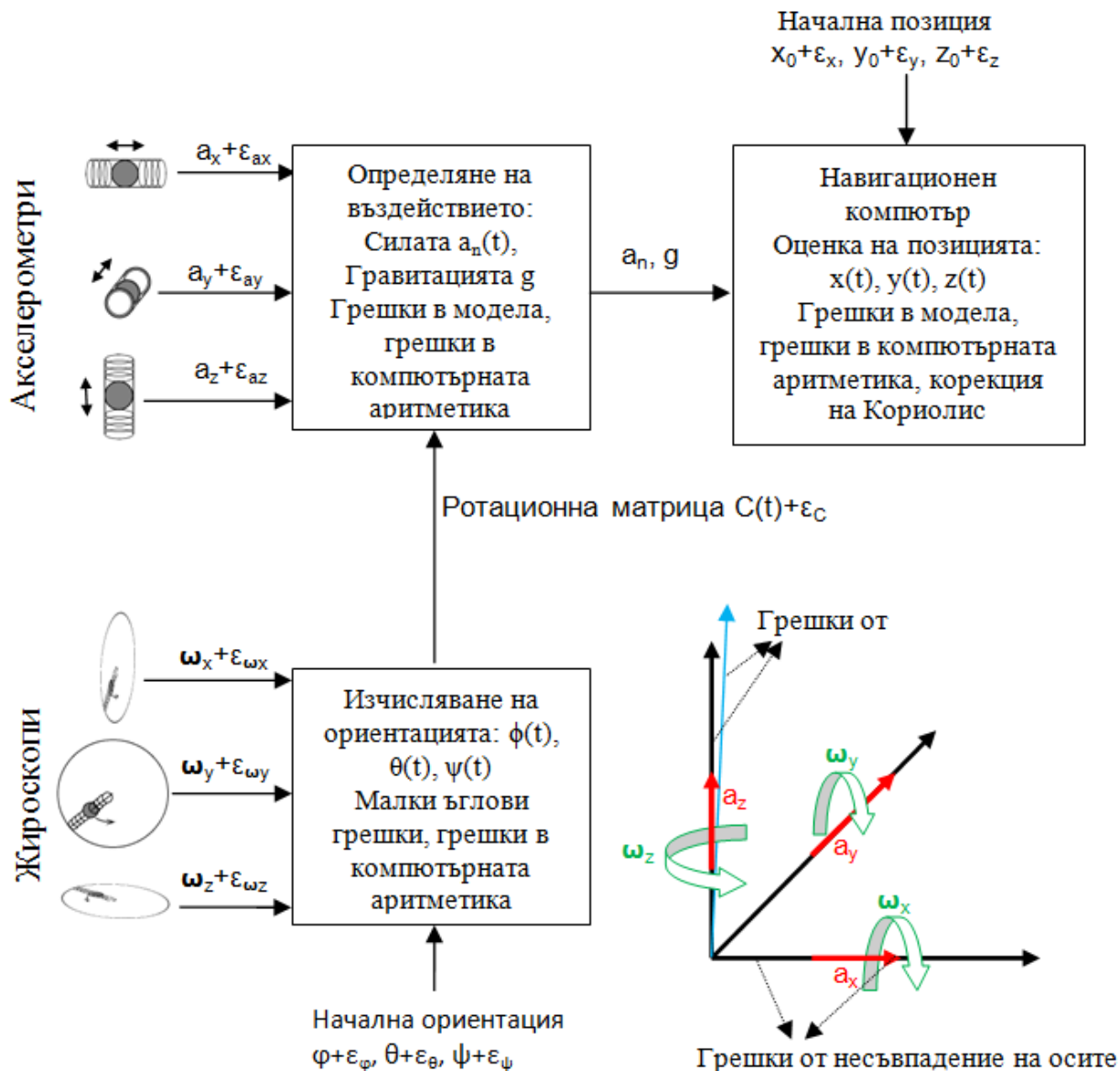
Фиг. 8. Реконструираната траектория на движение

Анализ на грешките на безплатформени навигационни системи.

Основен недостатък на инерциалните системи се крие в метода за определяне на координатите и ориентацията – с използване на предишното положение на движещата се платформа. Това води до акумулиране на грешки, които макар и да са малки на всяка стъпка, водят до огромни отклонения. В Таблица 1 [1] са показани стойностите на тези грешки за четири класа навигационни системи. От приведените значения се вижда, че даже прецизно реализирани системи натрупват бързо големи грешки във времето.

Таблица 1 Акумулирани грешки вследствие отклонение в показанията на акселерометъра

Клас	Допустимо отклонение в акселерометъра [mg]	Грешка в определяне на позицията [m]			
		1 s	10 s	60 s	1 hr
Навигационна	0.025	0.00013	0.012	0.44	1600
Тактическа	0.3	0.0015	0.15	5.3	19000
Индустриална	3	0.015	1.5	53	190000
Автомобилна	125	0.62	60	2200	7900000



Фиг. 6. Схема на определяне на позицията и ориентацията на подвижна платформа и възможни грешки

Основните грешки, влияещи върху точността на определяне позицията и ориентацията могат да бъдат групирани в следните три категории [3, 4]:

➤ Неточност на сензорите

- Отклонения (bias) на показанията на сензорите от истинските такива.
- Грешка в мащабирането, изразяващо се в несъответствие между реалните показания на сензорите и действително приложените сили.
- Грешки в резултат на несъвършенство на производствените технологии. Обикновено те са причинени от неортогоналност на осите на акселерометрите и

жироскопите, несъответствие между осите на акселерометъра и кореспондиращия му жироскоп и др.

- Сензорните измервания са под въздействието на адитивен Гаусов шум.
 - Температурно зависими грешки. Промяната на температурата води до отклонения в измерванията, които невинаги могат да бъдат 100% компенсирани.
 - Грешки, произтичащи от синхронизацията на получаваните измервания. Измерванията не винаги са извършени в един и същи момент от време.
 - Динамични грешки – закъснение в отчитането на нови въздействия от сензорите.
- Неточност на използвания модел и грешки от компютърната аритметика
- Неточностите в модела произтичат обикновено от недобрата апроксимация на сензорите или некоректната оценка на гравитационното ускорение.
 - Грешките при изчисляването възникват в резултат на ограниченията на компютърната дума, итерационните процедури за оптимизация, изчисляването на тригонометрични функции, загуба на ортонормалността на матриците и др.
- Външни източници на грешки (неконтролируеми, непредсказуеми, даже от неизвестни източници)
- Вибрации на платформата – те рязко снижават точността на приборите. Често пъти зависят от различни случайни фактори, динамиката на платформата, разпределението на масите, включването или изключването на различни устройства и др.
 - Други.

Благодарност

Авторът изказва благодарността си към фирма ММСолушънс АД за предоставеното оборудване по проект BG161PO003-1.1.06-0037-C0001 „Индустриални научни изследвания за създаване на технология за подобряване на качеството и стабилизация на изображението с използване на инерционни сензори” от Оперативната програма „Развитие на конкурентността на българската икономика” 2007-2013 г. за извършване на изследвания с инерциални навигационни системи.

Заклучение

Инерциалните сензори и инерциалните навигационни системи позволяват определянето на положението и ориентацията на подвижни тела без използване на външни ориентири или комуникация. С реализирането им на MEMS цената на тези сензори и системи стана достъпна за вграждане във всяка електроника. Един такъв пример са съвременните смартфони, в които вече се вграждат такива системи, макар и да не са разработени още приложения за тях. В статията е направен обзор на инерциалните сензори и навигационните системи и е направен опит за класификация на грешките, възникващи при използването им. Въпреки трудностите, съпътстващи внедряването на тези системи, очакванията на научната общност, индустриалците и потребителите са свързани с бърз растеж като обем на произвежданите системи и разширяване на приложенията с тяхното използване.

Литература

[1] <http://www.vectornav.com/index.php?&id=76>

[2] David H. Titterton, John L. Weston Navigation Technology - 2nd Edition, The Institution of Electrical Engineers, 2004, ISBN 0 86341 358 7

[3] Grewal, M.S., Weill L.R., Andrews A.P., Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration, John Wiley & Sons, 2001, ISBN 0-471-20071-9.

[4] Oliver J. Woodman, An introduction to inertial navigation, Technical Report UCAM-CL-TR-696, ISSN 1476-2986, 2007.