

1025

Upp och ned: Acceleration för hela kroppen i 1, 2 och 3 dimensioner

Ann-Marie Pendrill

Ann-Marie.Pendrill@physics.gu.se, professor i fysik vid Göteborgs universitet.

Vad är upp och var är ned? I en berg- och dalbana är det lätt att tappa riktningen. Från huvud mot fötter känns som ner, och pekar ofta rakt mot berg- och dalbanans spår. Det kan luta i nästan vilken riktning som helst, framåt, bakåt, i sidled och ibland just upp och ned. Under föredraget tittar vi på acceleration i loopar och skruvar i berg- och dalbanor och på vilka krafter kroppen utsätts för - i 1, 2 och 3 dimensioner. Att koppla kroppens upplevelser till bilden av attraktionen och analys av data kan bidra till att utveckla en fördjupad förståelse av acceleration och Newtons lagar.



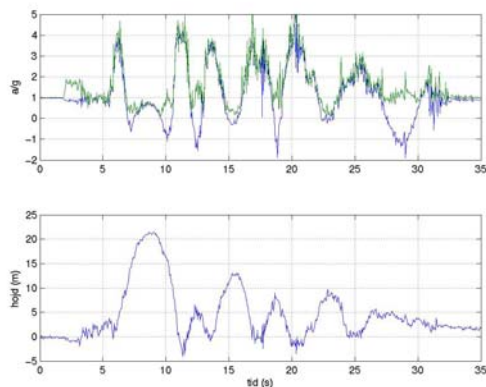
Figur 1: Lisebergs berg- och dalbana Kanonen sedd från sidan. Bilden visar utskjutningen sker från vänster på bilden mot "Top Hat" till höger, och även loopens form.



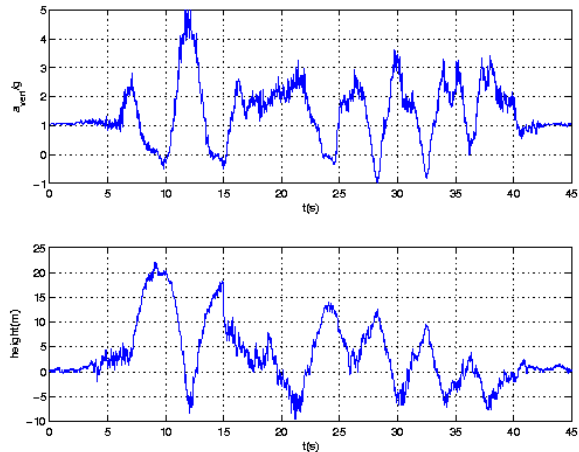
Figur 2: Panorama över Speed Monster. Utskjutningen sker från höger in mot den inverterade "norska" loopen som går runt rulltrappan. (Foto: Jochen Peschel, [1])

1. Inledning

En kropp förblir i sitt tillstånd av vila eller likformig rätlinjig rörelse ..." Textböckernas "kroppar" som utsätts för krafter i Newtons lagar är sällan levande. Om textbokens kropp någon gång accelereras är det från vila, med konstant acceleration. I vardagen låter vi våra kroppar uppleva acceleration i alla riktningar, även om vi inte alltid tänker på det. Ett nöjesfältts åkattraktioner bjuder på accelerationer och rotationer i renodlade rörelser [2] och den kropp som accelereras är vår egen - även om ibland går så fort att man knappt hinner förstå vad som hänt innan det är över. Med en accelerometer kan man mäta och få en graf över vad kroppen upplever och de krafter man utsätts för i olika delar av en attraktion. Att koppla kroppens upplevelser till bilden av attraktionen och analys av data kan bidra till att utveckla en fördjupad förståelse av Newtons lagar. Den 37 sekunder långa turen i Kanonen (Figur 1) på Liseberg i Göteborg och Speedmonster (Figur 2) på TusenFryd i Oslo låter mätningarna av acceleration i alla tre riktningarna komma till sin rätt under olika delar (Figur 3-4).



Figur 3: Accelerometer och höjd-data för Kanonen. Den gröna accelerometer-grafen visar beloppet av "g-kraften" medan den blå bara visar komponenten vinkelrätt mot spåret. Den undre grafen visar höjdkurvan som mäts samtidigt av sensorns inbyggda barometer.

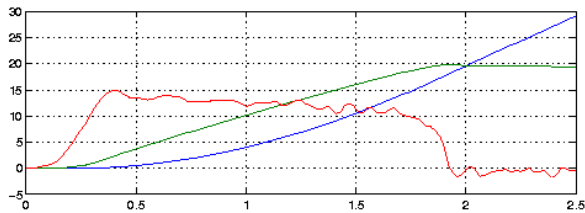


Figur 4: Accelerometer- och höjd-data för Speed Monster.

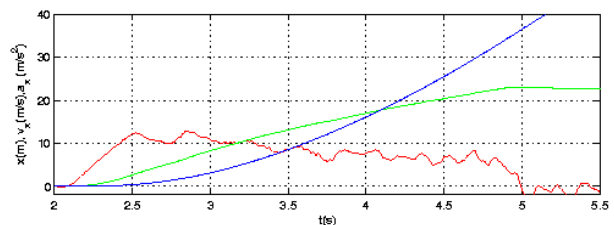
2. Endimensionell rörelse

Kanonen, som invigdes på Liseberg 2005 och Speedmonster som invigdes på Tusenfryd 2006 [3], liknar inte en vanliga berg- och dalbana: Den första backen, "uppdraget" där tåget dras upp till sin högsta punkt har ersatts med en lång raksträcka. Alla berg- och dalbanor bygger på omvandling mellan kinetisk och potentiell energi. Normalt tillförs ingen extra energi under turen. I traditionella berg- och dalbanor får tåget den energi som behövs genom att dras upp till tillräcklig höjd. Turen i Kanonen och Speed Monster inleds i stället med en horisontell utskjutning.

Energien som behövs för att skicka iväg tåget lagras genom att komprimera kvävgas till 300 gånger normalt atmosfärstryck. Under utskjutningen expanderar kvävet och skickar ut hydraulolja för att driva en vajervinsch som skickar iväg tåg och passagerare ut från stationen. Under utskjutningen minskar trycket till ca 250 atm [1,5,6]. Figur 5 och 6 visar accelerometerdata från starten, och även hastighet och tillryggalagd sträcka.



Figur 5: Horisontell acceleration (m/s^2) för the Kanonens utskjutning, tillsammans med hastighet (m/s) och sträcka (m), som erhållits genom numerisk integration. Vilken graf är vilken?



Figur 6: Acceleration (m/s^2), hastighet (m/s) och sträcka (m) för Speed Monster.

2.1 Accelerometerns koordinatsystem

Eftersom accelerometern följer med under turen ändras koordinataxlarna hela tiden och man brukar utnyttja ett koordinatsystem där den "vertikala" z-axeln pekar rakt upp från spåret, den "longitudinella" x-axeln pekar i spårets riktning och den "laterala" y-axeln pekar åt vänster (så att man får ett högersystem). En accelerometer kan inte heller mäta ren acceleration, utan mäter i stället den kraft som utövas på en massenhet. Resultatet kan anges som olika komponenter av vektorn $\mathbf{a-g}$, ofta uttryckt i enheten "g", dvs det som ofta betecknas med "g-kraft".

Om friktion försummas kommer vektorn $\mathbf{a-g}$ inte att ha någon komponent i spårets riktning (utom under start och inbromsning). Detta kan man också observera genom att gunga med accelerometern i en vanlig lekplatsgunga - eller låta den hänga i ett snöre. Om spårets lutning i sidled ("dosering") är perfekt anpassat till turen kommer den laterala komponenten av accelerometer-data att vara noll. I en "idealiserad" berg- och dalbana behövs alltså bara den vertikala accelerometern. I Figur 3 och 4 visas den vertikala komponenten. Större avvikelser kan noteras i start och inbromsning (då accelerationen är i longitudinell led) och under den avslutande "heartline roll", som diskuteras nedan.



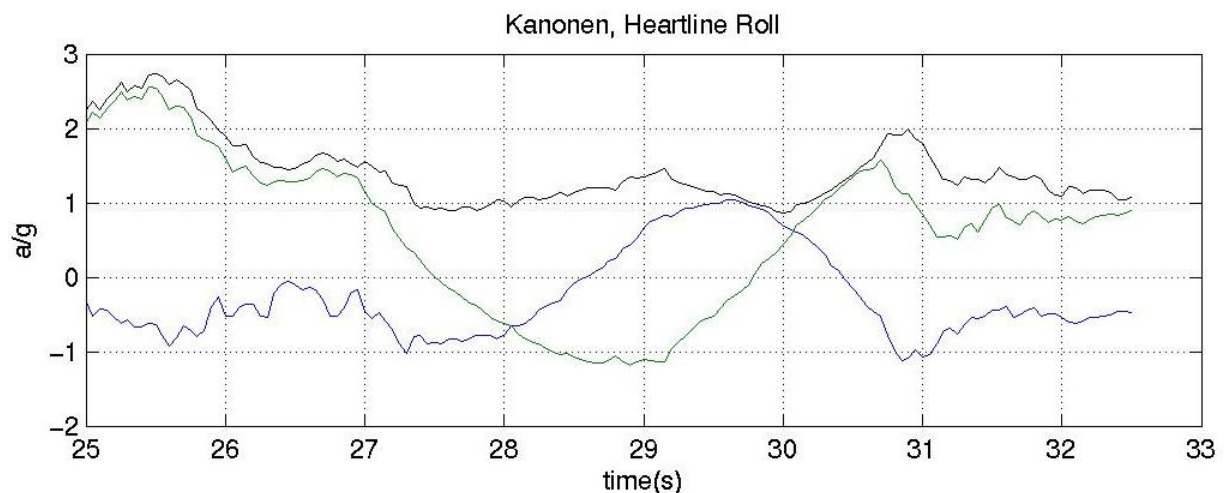
Figur 7: Kanonen: På bilden är tåget just på väg genom loopen in i hjärt-linje-rullningen ("heartline roll"), där kroppens tyngdpunkt rör sig nästan rätlinjigt.

2.2. Likformig rätlinjig rörelse med skruv

På väg tillbaka till Kanonens station gör tåget ett avslutande ärovarv, genom loopen, ovanför dem som väntar (Figur 7). Spåret vrider sig nästan ett helt varv runt tåget. Denna del kallas "heartline roll" eller "heart roll". Kroppens tyngdpunkt rör sig med nästan konstant hastighet. Vilka krafter verkar då på kroppen? Figur 8 visar accelerometerdata för denna del av turen.

Man kan lätt frestas att tro att en mätning med en tredimensionell accelerometer ger en fullständig beskrivning av rörelsen som kan användas för att återskapa spårets form. Om kroppen inte roterade skulle det dock i princip vara möjligt att få samma accelerometerdata som i intervallet mellan 27 och 30 sekunder genom att röra sig upp-ned och höger-vänster, något 20-tal meter i varje riktning. (Låt vara att höjdmätningen motsäger denna tolkning!)

I den likformiga rätlinjiga rörelsen i hjärtlinjerullningen är det uppenbart för den som åker att rotationen spelar roll för kroppens upplevelse - vi är inte punktformiga massor! En "motion tracker" behöver även mäta rotation kring de tre koordinataxlarna för att få en fullständig beskrivning av rörelsen [7]. En tredimensionell accelerometersmätning ger dock mycket underlag för analys av kända rörelser.



Figur 8: Accelerometerdata i "heartline roll". De vertikala och laterala (i sidled) visas tillsammans med totala "g-kraften" på kroppen. Eftersom kroppen rör sig med nästan konstant hastighet blir totala kraften från tåget på kroppen mg , motriktad tyngdkraften, även om riktningen ändras i förhållande till kroppens och accelerometers rotterande koordinatsystem.

2.3 Loopar och skruvar

Bilderna i Figur 1 och 2 visar looparna i Kanonen och Speedmonster och även den avslutande korksruven i Speedmonster. Titta noga så ser du att looparna inte är helt cirkelformade, utan en s.k. klotoider. Cirkelbågen högst upp går över i en del av en "Cornu-spiral", där krökningsradien blir större närmare marken, för att minska påfrestningen på kroppen [8,9]. Klotoider används för att förena delar av kurvor med olika krökningsradier, vilket t.ex. har använts bl.a. vid konstruktion av motorvägsavfarter [10]. På detta sätt kan man kombinera en liten krökningsradie i loopsens topp med en större närmare marken, så att belastningen på kroppen begränsas. Genom att undvika en tvär minskning av krökningsradie minskas också belastningen på halsen: I tidigare loopkonstruktioner uppstod whiplash-skador när kroppen började röra sig uppåt medan huvudet fortsatte framåt/nedåt. Klotoidformen för loopar introducerades av Werner Stengel 1976 i berg- och dalbanan Revolution [2,8]. Den diskuteras i mer detalj i ref. [9].

3. Planera ett besök

En utflykt med en klass kräver många praktiska förberedelser. Läraren har ett stort ansvar. Ibland kan alla praktiska detaljer göra det lätt att glömma den viktiga förberedelsen av själva ämnesinnehållet. Ett besök på ett nöjesfält leder inte i sig själv till fysikkunskaper - eleverna kan ha varit där många gånger tidigare utan att ha reflekterat över att upplevelserna kan beskrivas med fysiktermer. Det är en fördel om eleverna har provat mätutrustningen i förväg i en mer välbekant miljö, t.ex. i en hiss eller på en lekplats [12], och om de haft tillfälle att titta på mätresultaten.

För den som inte själv vill mäta i de olika attraktionerna finns möjlighet att utnyttja tidigare mätningar. Eleverna kan t.ex. få identifiera olika attraktioner på ett blad med accelerometergrafer. I projektet Slagkrafts lärarrum [1] finns förslag på många andra aktiviteter. Vill du ha hjälp att planera ett besök - tag gärna kontakt med Ann-Marie.Pendrill@physics.gu.se så kan vi tillsammans ta fram uppgifter som passar just din klass och diskutera vilka mätningar som är möjliga att genomföra. Kontakta oss också om du vill vara med som observatör när vi besöker Liseberg med studenter.

Tack

Bo Larsson, Daniel Lindberg och Ulf Johansson har gett oss möjlighet att studera fysik på Liseberg, och vi vill tacka för många inspirerande diskussioner kring teknik, säkerhet och planering. Vi vill också tacka Zenit läromedel, som har gett oss möjlighet att prova olika sensorer, och lärare, studenter och elever som experimenterat och gett förslag och konstruktiv kritik.

Referenser

1. Peschel J 2006 Speed Monster - Powerrausch am Felshang, Coasters and More, <http://www.coastersandmore.de/rides/speedmonster/speedmonster.shtml>
2. Slagkraft - Naturvetenskap på Liseberg, <http://physics.gu.se/LISEBERG/>
3. Marden D 2007 *Roller Coaster Data Base*, <http://www.rcdb.com>
4. Vernier, Wireless Dynamic Sensor System (WDSS), <http://www.vernier.com/labequipment/wdss.html>,
5. Duane Marden, 3,2, 1, Launch, FunWorldMagazine, Juli 2003, http://www.funworldmagazine.com/2003/Jul03/Features/3_2_1_Launch!/3_2_1_Launch!.html
6. Jochen Peschel, *Kanonen - great firepower at Liseberg*, Coasters and More, <http://www.coastersandmore.de/previews/kanonen/kanonen.shtml> och http://www.coastersandmore.de/rides/kanonen/kanonen_eng.shtml
7. Pendrill A-M and Rödjegård H 2005 *A Roller Coaster Viewed Through Motion Tracker Data*, Physics Education, **40** 522-26
8. Ingeniebüro Stengel, <http://www.rcstengel.com> Klaus Schützmannsky *Roller Coaster - Der Achterbahn-Designer Werner Stengel* (2001)
9. Ann-Marie Pendrill, *Roller Coaster Loop Shapes*, Physics Education, **40** 517-21 (2005)
10. Erik Vestergaard, *Vejgeometri*, <http://www.matematiksider.dk/vejgeometri.html>.