

Stelkroppssimulering

Tomas Forsyth Rosin, Jonas Zeitler, Emil Axelsson, Karl Johan Krantz

15 mars 2013

Sammanfattning

Sammanfattning av projektet.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
2	Modell	1
3	Kollisionslösning	2
3.1	Expanding Polytope Algorithm (EPA)	2
3.2	Linjär Kollisionslösning	2
3.3	Icke-linjär kollisionslösning	3
4	Kollisionsdetektion	4
4.1	Detektionsmetod	4
4.1.1	Separating Axis Test	4
4.1.2	Gilbert-Johnson-Keerthi	4
4.2	Optimering	5
4.2.1	Bounding boxes	5
4.2.2	Quadtree	5
5	Kollisionslösning	5
6	Kollisionsrespons	5
6.1	Impulsbaserade system	5
6.1.1	Praktiskt förlopp	5
6.2	Penalty-baserade system	7
6.2.1	Tillvägagångssätt	7
6.2.2	Övergång	7
7	Krafter i impulsbaserade system	8
7.1	Kraftgeneratorer	8
7.2	Fjäderkrafter	8
7.3	Friktion	8
8	Resultat	9
9	Diskussion	10

Figurer

1	Exempel på linjär utflyttning	2
2	Exempel på icke-linjär utflyttning	4
3	Impulser i kollisionspunkten	6
4	Tillämpning av dämpade fjädrar som kontaktmodell	7
5	Energibevarande kollisioner	10
6	Vilande kroppar	11
7	Massa-fjäder-system	12

Tabeller

A	Tillstånd och egenskaper hos olika entiteter	1
---	--	---

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Fysiksimulering är en vital del av många moderna datorspel. I spelsammanhang kallas detta för ett spels *fysikmotor*. Att implementera en fysikmotor handlar om att skapa en miljö med regler till vilka en uppsättning objekt måste förhålla sig. I många spel utgörs fysikmotorns bas av en *stelkroppssimulering*, vilket innebär vissa antaganden och förenklingar av verkligheten. Mest påtagligt är att systemets objekt antas vara okomprimerbara, eller stela. Även med dessa förenklingar i beaktning är implementation av en fysikmotor ett komplext problem, som kan lösas på olika sätt beroende på aktuella förutsättningar och tillämpningsområden.

1.2 Syfte

Syftet med denna rapport är att beskriva utvecklingen av en fysikmotor, som ska kunna användas i datorspel med tvådimensionell grafik. Motorn ska ha stöd för att simulera kollisioner och friktion mellan stelkroppar modellerade som generella konvexa polygoner. Den ska också innehålla stöd för fjädrar och dämpare, som ska kunna fästas i stelkropparna. Motorn ska producera trovärdiga resultat vid såväl kollisioner som när flera stelkroppar vilar på varandra. Eftersom motorn ska kunna användas till datorspel behöver algoritmerna som används vara tillräckligt tidseffektiva för att tillåta interaktivitet. Motorn ska implementeras i C++ med hjälp av grafikbiblioteket OpenGL varpå resultatet ska utvärderas i rapporten.

2 Modell

I modellen som skulle simuleras ingick tre typer av entiteter: rörliga stelkroppar, fasta stelkroppar samt fjädrar med dämpning. Varje entitet kan ha både konstanta egenskaper och variabla tillstånd, enligt tabell A.

Tabell A: Tillstånd och egenskaper hos olika entiteter

Rörliga stelkroppar		Fasta stelkroppar		Fjädrar med dämpare	
Tillstånd	Egenskaper	Tillstånd	Egenskaper	Tillstånd	Egenskaper
Position	Densitet		Position		Infästningspunkter
Vinkel	Studs-koefficient		Vinkel		Fjäderkonstant
Hastighet					Dämpningskoefficient
Vinkelhastighet					

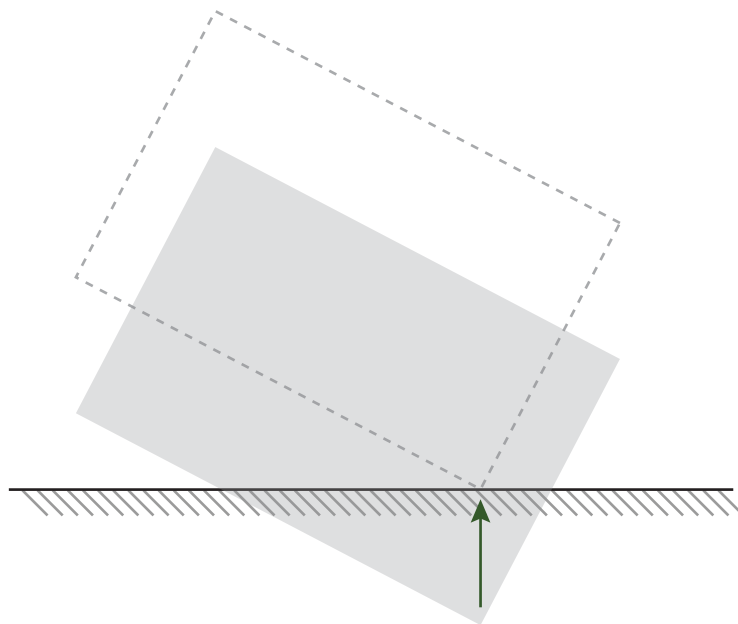
3 Kollisionslösning

Att två objekt interpenetrerar varandra representerar inget verkligt fysikaliskt förlopp. Det första som därför måste göras när en sådan händelse upptäckts är att flytta ut objekten från varandra. En metod för detta är att hitta det tidssteg mellan innevarande och föregående bildruta då objekten kolliderade. En analytisk lösning är emellertid komplicerad att implementera med tanke på translations- och rotationshastigheter. En enklare metod är att hitta den punkt hos polygon A som interpenetrerar längst och betrakta den sida på polygon B som ligger närmast denna punkt som en trolig kollisionssida. Hur objekten sedan separeras från varandra går att lösa på olika sätt - linjärt

3.1 Expanding Polytope Algorithm (EPA)

I denna tillämpning användes metoden EPA (Expanding Polytope Algorithm) för att hitta penetrationspunkten och en vektor mellan denna punkt och kollisionssidan, nedan kallad penetrationsvektorn. I det konvexa höljet av Minkowskidifferensen, beskriven i avsnitt ??, kommer den linje med minst avstånd till origo att vara av intresse. De punkter som spänner upp denna linje har genererats utifrån penetrationspunkten, i BEHÖVER FIGUR benämnd c, och de två punkter, d och e, som spänner upp kollisionssidan.

3.2 Linjär Kollisionslösning



Figur 1: Exempel på linjär utflyttning

En linjär kollisionslösning är det enklaste sättet att lösa interpenetration. Penetrationen löses sådant att kropparna a och b (Figur 1) translateras i penetrationsvektorns positiva respektive negativa riktning. Hur stor del av penetrationsvektorn respektive kropp skall

translateras beräknas med avseende på dess omvända relativa massa enligt (1).

$$J_{part} = \frac{m1}{m1 + m2} \quad (1)$$

Att translatera en rörlig kropp ut från en stationär kropp utan att påverka dess hastighet medför en förändring av systemets energi. För att motverka detta beräknas hastigheten om med avseende på utflyttningen och gravitationen.

$$|\bar{v}| = \sqrt{|v|^2 - 2 \cdot |g_y| \cdot t_y} \quad (2)$$

Ekvation (2) beskriver den nya hastigheten v där t är kroppens utflyttningsvektor och g är den aktuella gravitationen för systemet.

3.3 Icke-linjär kollisionslösning

Linjära lösningar för interpenetration skapar problem för kroppar i vila. Detta eftersom gravitationen påverkar kropparna vilket resulterar i interpenetration med underlaget. Detta resulterar i sin tur i en linjär utflytt med avseende på den punkt med längst penetrationsvektor. För kroppar i vila innebär detta att de kommer vibrera istället för att ligga stilla. Dessutom kan det visas att önskad friktion introduceras i systemet. Ett förslag till förbättring är att dela upp utflytt av en kropp till två komponenter. En linjär förflyttningskomponent med avseende på kroppens tröghet (3) och en rotationskomponent med avseende på kroppens tröghetsmoment (4).

$$lm_i = \frac{\frac{1}{m_i}}{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{1}{I_1} + \frac{1}{I_2}} \quad (3)$$

$$am_i = \frac{\frac{1}{m_i}}{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{1}{I_1} + \frac{1}{I_2}} \quad (4)$$

I simuleringen implementerades endast den linjära utflyttningskomponenten (3) och sedan en explicit lösning (Figur 2) för hur kroppen ska roteras ut.

Metoden innebär att lösa ett ekvationssystem med fyra rötter och sedan testa vilken lösning som ger den optimala, dvs. minsta, rotationen ut.

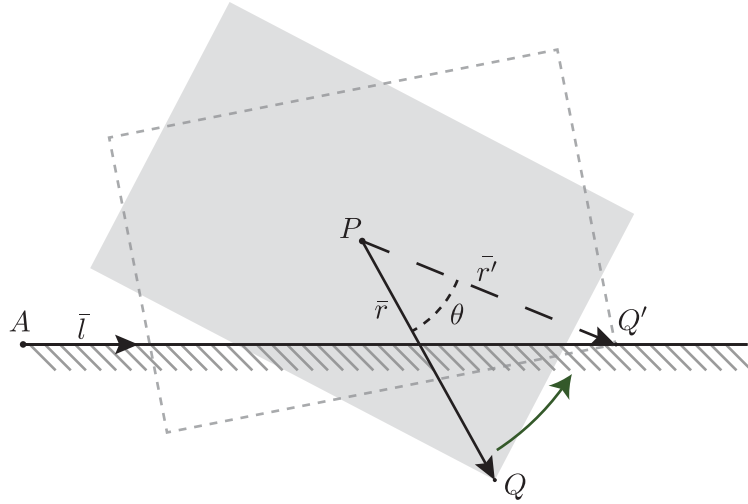
$$Q' = P + \bar{r}' = A + s \cdot \bar{l} \quad (5)$$

$$|\bar{r}|^2 = |\bar{r}'|^2 = (Q - P)^2 = (Q' - P)^2 \quad (6)$$

$$\theta = \arccos \frac{\bar{r} \cdot \bar{r}'}{|\bar{r}|^2} \quad (7)$$

Från (5) och (6) löses \bar{r}' ut och rotationen beräknas enligt (7).

För djupa penetrationer mellan kroppar med stor tröghet kan den linjära komponenten inte räcka för att lösa interpenetrationen utan gör att rotationen förvärrar interpenetrationen. I dessa fall kan en nedre gräns för den linjära komponenten införas för att vikta förhållandet mellan rotation och translation [BEHÖVER REFERENS].



Figur 2: Exempel på icke-linjär utflyttning

4 Kollisionsdetektion

Det första steget mot att simulera stelkroppars interaktion är att detektera alla kolliderande polygoner i scenen. Att två objekt i ett diskret system ligger dikt an varandra är sällsynt. Vanligare är att de interpenetrerar varandra, d.v.s. att ett hörn hos ett objekt ligger inuti ett annat objekt.

4.1 Detektionsmetod

I detta projekt diskuterades i huvudsak två metoder för kollisionsdetektion.

4.1.1 Separating Axis Test

För att utreda eventuell interpenetration mellan två givna objekt kan SAT [1, s. 29] (*Separating Axis Test*) användas. Testet kan avgöra om objekten inte kolliderar genom att hitta en vektor på vilken objekten projiceras på disjunkta intervall (Figur ??). Ett högre antal vektorer ökar beräkningstiden men också sannolikheten för ett korrekt resultat.

4.1.2 Gilbert-Johnson-Keerthi

För att inte göra avkall på noggrannheten har en annan metod, GJK [1, s. 30] (*Gilbert-Johnson-Keerthi*), använts för detta projekt. Eftersom metoden kan utesluta fler möjliga kollisioner kommer senare beräkningar kräva mindre tid. GJK bygger på Minkovskidifferensen mellan de två objekten, definierad enligt (8).

$$\chi_1 \ominus \chi_2 = \{x_1 - x_2 | x_1 \in \chi_1, x_2 \in \chi_2\} \quad (8)$$

De två objekten korsar varandra om, och endast om, polygonen som Minkovskidifferensen renderar innehåller origo. GJK-algoritmen utreder detta på ett sätt som minskar antalet beräkningar från polynomiellt till linjärt beroende av antalet punkter i objekten [3].

4.2 Optimering

Att undersöka kollisioner för alla par av objekt i varje bildruta medför omfattande beräkningar och sänker programmets effektivitet betydligt. För att undvika dessa beräkningsmängder görs först olika bedömningar av vilka objekt som riskerar att kollidera varefter de tyngre kollisionsdetektorerna appliceras endast på dessa par.

4.2.1 Bounding boxes

För att förenkla representationen av objekt användes Bounding Boxes. För varje punkt i objektet beräknas den maximala respektive minimala koordinaten i alla dimensioner. Av dessa värden konstrueras sedan nya punkter som bildar ett rätblock (rektangel i två dimensioner) med sidor parallella med koordinataxlarna. Alla punkter i objektet kommer att ligga i detta rätblock vilket gör att man snabbt kan utesluta förekomster av punkter i stora områden.

4.2.2 Quadtree

5 Kollisionslösning

6 Kollisionsrespons

6.1 Impulsbaserade system

I det system som simuleras måste någon representation av krafter mellan kroppar finnas. En vanlig förenkling är att se krafter som momentana händelser i tiden. Detta introducerar begreppen impuls och rörelsemängd. Impulser kan relateras till krafter enligt (9).

$$\bar{J} = \int_{\Delta t} \bar{F} dt = \int_{\Delta t} m\bar{a} dt = m\bar{v} \quad (9)$$

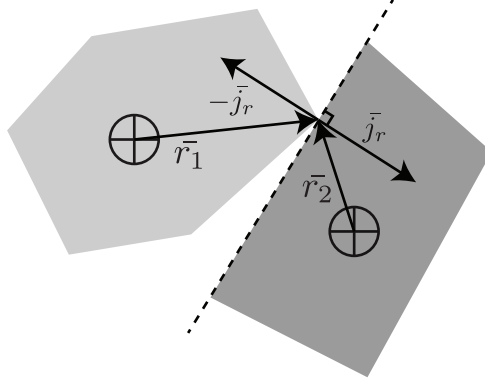
Den aktuella implementationen av (9) innehöll inget begrepp om tid utan t representerades istället av ett simuleringssteg.

6.1.1 Praktiskt förlopp

Då en kollision detekteras ska fysikmotorn lösa vilka krafter som uppstår mellan kropparna. En nödvändig förenkling är att endast hantera kollisioner som sker mellan hörn och sida för kroppar. Detta är de absolut vanligast förekommande kollisionerna och det är ur optimeringssynpunkt inte värt att ta hänsyn till andra typer av kollisioner. Den data som finns tillgänglig för kollisionsresponderen är:

- De kroppar som ingår i kollisionen
- I vilken punkt kollisionen sker
- Normalvektorn för kollisionsplanet/-sidan

Lösningen för den resulterande impulsens magnitud, j_r , illustreras bäst genom att först förstå hur impulsen appliceras på kropparnas hastighet och vinkelhastighet.



Figur 3: Impulser i kollisionspunkten

$$\bar{v}'_1 = \bar{v}_1 + \frac{j_r}{m_1} \hat{n}, \quad \bar{v}'_2 = \bar{v}_2 + \frac{j_r}{m_2} \hat{n} \quad (10)$$

$$\omega'_1 = \omega_1 + \frac{j_r}{I_1} (\bar{r}_1 \times \hat{n}), \quad \omega'_2 = \omega_2 + \frac{j_r}{I_2} (\bar{r}_2 \times \hat{n}) \quad (11)$$

För ekvation (10-11) är alla parametrar kända, utom \bar{v}'_i , ω'_i och j_r . Vektorn \bar{r}_i är vektorn från i :te kroppens masscentrum till kollisionspunkten, P , vilken är gemensam för båda kropparna i kollisionen. Normalvektorn, \hat{n} , ges som inparameter från expanding polytope algoritmen. Punktens hastighet för respektive kropp beräknas enligt (12).

$$\bar{v}_{i_P} = \bar{v}_i + \omega \times \bar{r}_i \quad (12)$$

$$\bar{v}'_r \cdot \hat{n} = -e \bar{v}_r \cdot \hat{n} \quad (13)$$

$$\bar{v}_r = \bar{v}_{1_P} - \bar{v}_{2_P}, \quad \bar{v}'_r = \bar{v}'_{1_P} - \bar{v}'_{2_P} \quad (14)$$

Ekvation (13) relaterar kropparnas separationshastighet (14), före och efter kollisionen. Parametern e anger materialens studscoefficient. Genom substitution av (10-12) i (13) kan kollisionsimpulsen lösas ut enligt (15).

$$j_r = \frac{-(1+e)\bar{v}_r \cdot \hat{n}}{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \left(\frac{1}{I_1}(\bar{r}_1 \times \hat{n}) \times \bar{r}_1 + \frac{1}{I_2}(\bar{r}_2 \times \hat{n}) \times \bar{r}_2\right) \cdot \hat{n}} \quad (15)$$

Genom detta skapas en grundläggande teori om hur kollisioner ska bete sig i simuleringen. En impuls beräknas i (15) och appliceras sedan i (10) och (11).

Under implementationen introducerades ett specialfall för kollision mellan rörlig och icke-rörlig kropp. Detta resulterade i en förenklad impulsmodell enligt (16).

$$j_r = \frac{-(1+e)\bar{v}_r \cdot \hat{n}}{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{I_1}(\bar{r}_1 \times \hat{n}) \times \bar{r}_1 \cdot \hat{n}} \quad (16)$$

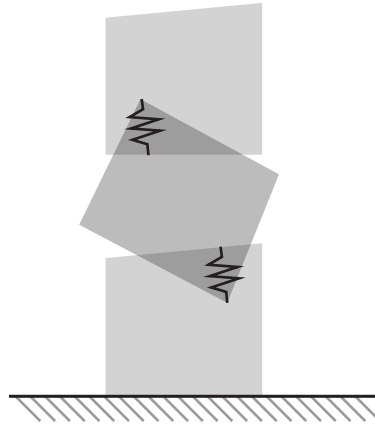
Ekvation (16) kan likställas med att sätta den stationära kroppens massa och tröghetsmoment till ∞ .

6.2 Penalty-baserade system

Vid kollision mellan två kroppar i verkligheten är det två kontinuerliga motriktade krafter som verkar på objekten, dessa krafter är aktiva över en kort tidsperiod, något som gör att det är mer korrekt att använda än impulsbaserad kollisionslösning. Vid vilande kontakt är detta dock inte en lösning som ger trovärdiga resultat, vilket diskuterats ovan. Detta eftersom det sällan endast är ett hörn som är i kontakt mellan två kroppar i vila. Vid implementation ansågs därför att en penalty-baserad kollisionslösning var mer lämplig i dessa fall.

6.2.1 Tillvägagångssätt

Metoden medför att en utflyttning ej sker, objekt använder sig istället av mindre impulser för att fjädra ifrån varandra. Detta kan illustreras (Figur 4) som dämpade fjädrar som spänns mellan kropparna längs penetrationsvektorn.



Figur 4: Tillämpning av dämpade fjädrar som kontaktmodell

Ekvation (17) anger den impuls J som ger fjädringen på båda objekten.

$$\bar{J} = C \cdot \bar{P} \quad (17)$$

Där C är en framerate-baserad konstant och \bar{P} är penetrationsvektorn mellan de två objekten.

6.2.2 Övergång

En övergång mellan de två lösningsmetoderna är aktuell först när objekt vilar på varandra, vilket innebär att deras relativa hastighet i kollisionspunkten är låg. En tröskel som varierar med de aktuella egenskaperna hos systemet kan ge mer korrekta lösningar. Vid empiriska tester så sattes emellertid en fast tröskel för övergången mellan metoderna.

7 Krafter i impulsbaserade system

7.1 Kraftgeneratorer

Hittills har endast momentana krafter mellan objekt diskuterats. Det har också poängterats att detta är en förenkling av vad som sker i stötar och kontakt. En kollision mellan två objekt orsakar kompression hos materialen i respektive objekt vilket i sin tur ger upphov till krafter mellan kropparna [4].

Vissa fysikmotorer delar upp varje tidssteg i mindre delar och kan på så sätt erhålla en bättre approximation för vissa krafter. Dessa metoder kallas tidsderiverande. En tidsderiverande fysikmotor kan använda simuleringsmetoder, t.ex. Runge-Kutta, som kräver information om flera olika tillstånd hos systemet.

I simuleringen implementeras kraftgeneratorer för gravitation och fjäderkrafter.

7.2 Fjäderkrafter

En fysikmotor som implementerar massa-fjäder-system och harmonisk rörelse kräver att det finns mer sofistikerade simuleringsmetoder än Euler för icke-triviala fall. Detta motiverar att låta fjäderkrafter vara kraftgeneratorer och därmed simuleras med en Runge-Kuttalösning.

Hookes lag beskriver den kraft en fjäder påverkar andra objekt med. Kraften beror av hur utdragen eller sammanpressad fjädern är. Det vill säga, kraftgeneratoren behöver endast positionen av fjäderns infästningspunkter för att beräkna fjäderkraften.

$$f = -k \cdot \Delta l \quad (18)$$

I ekvation (18) är k fjäderkonstant och Δl anger hur utdragen eller sammanpressad fjädern är. Lösningen för (18) ger endast kraftens magnitud, för en flerdimensionell simulering utökas ekvationen till att även innehålla kraftens riktning (19).

$$f = -k(|\bar{d}| - l_0)\hat{d} \quad (19)$$

$$\bar{d} = x_A - x_B \quad (20)$$

Parametrar x_A och x_B (20) är infästningspunkter med avseende på position och rotation för ett tillstånd y_t .

Ett viktigt resultat för Hookes lag är att den resulterande kraften f verkar lika mycket i fjäderns båda ändar.

7.3 Friktion

Den allra vanligaste friktionsmodellen är Coloumbs modell. Den baserar sig i att den friktionskraft som påverkar en kropp är proportionell mot normalkraften mellan kroppen och underlaget. Modellen är egentligen en sammanslagning av två modeller, statisk och dynamisk friktion.

$$\bar{f}_s = \mu_s \cdot \bar{N} \quad (21)$$

$$\bar{f}_s = \mu_d \cdot \bar{N} \quad (22)$$

Där den statiska modellen (21) används för kroppar i vila och den dynamiska (22) för kroppar i rörelse. Båda modellerna kan endast ge upphov till friktionskrafter som är proportionella mot de yttre krafter som verkar på kroppen. Friktionskrafter verkar i kontaktplanets tangentriktning, \hat{t} .

$$f_t = \begin{cases} -(\bar{f}_{ext} \cdot \hat{t})\hat{t}, & \bar{v}_r = \bar{0}, \bar{f}_{ext} \cdot \hat{t} \leq \bar{f}_s \\ -\bar{f}_s \cdot \hat{t}, & \bar{v}_r = \bar{0}, \bar{f}_{ext} \cdot \hat{t} > \bar{f}_s \\ -\bar{f}_d \cdot \hat{t}, & \bar{v}_r \neq \bar{0} \end{cases} \quad (23)$$

Enligt (23) kan endast en extern kraft i kontaktplanet som överstiger den maximala statiska friktionskraften sätta en kropp i rörelse. I annat fall motverkas kraften av en lika stor friktionskraft vilket medför att kroppen förblir vilande.

Den friktionsmodell som används i simuleringen är ingen kraftgenerator utan tar endast hänsyn till impulser vid kontakt. En omskrivning av (21-23) ger den friktionsimpuls som motsvarar \bar{f}_t .

$$\bar{j}_s = \mu_s \cdot \bar{j}_r \quad (24)$$

$$\bar{j}_d = \mu_d \cdot \bar{j}_r \quad (25)$$

$$j_f = \begin{cases} -(m\bar{v}_r \cdot \hat{t})\hat{t}, & \bar{v}_r = \bar{0}, m\bar{v}_r \cdot \hat{t} \leq \bar{j}_s \\ -\bar{j}_s \cdot \hat{t}, & \bar{v}_r = \bar{0}, m\bar{v}_r \cdot \hat{t} > \bar{j}_s \\ -\bar{j}_d \cdot \hat{t}, & \bar{v}_r \neq \bar{0} \end{cases} \quad (26)$$

Friktionsimpulsen (26) appliceras samtidigt som kollisionsimpulsen för respektive kropp och kollision. Ekvation (24-26) är en ideal [Gravitas] friktionslösning för impulsbaserade system. Det kan emellertid visas att (24) och (25) inte ger energibevarande lösningar för höga värden på μ_s och μ_d .

Friktion simulerades utan hänsyn till friktionstal mellan specifika material. Istället har en naiv förenkling till de allra mest grundläggande egenskaperna implementerats enligt (27).

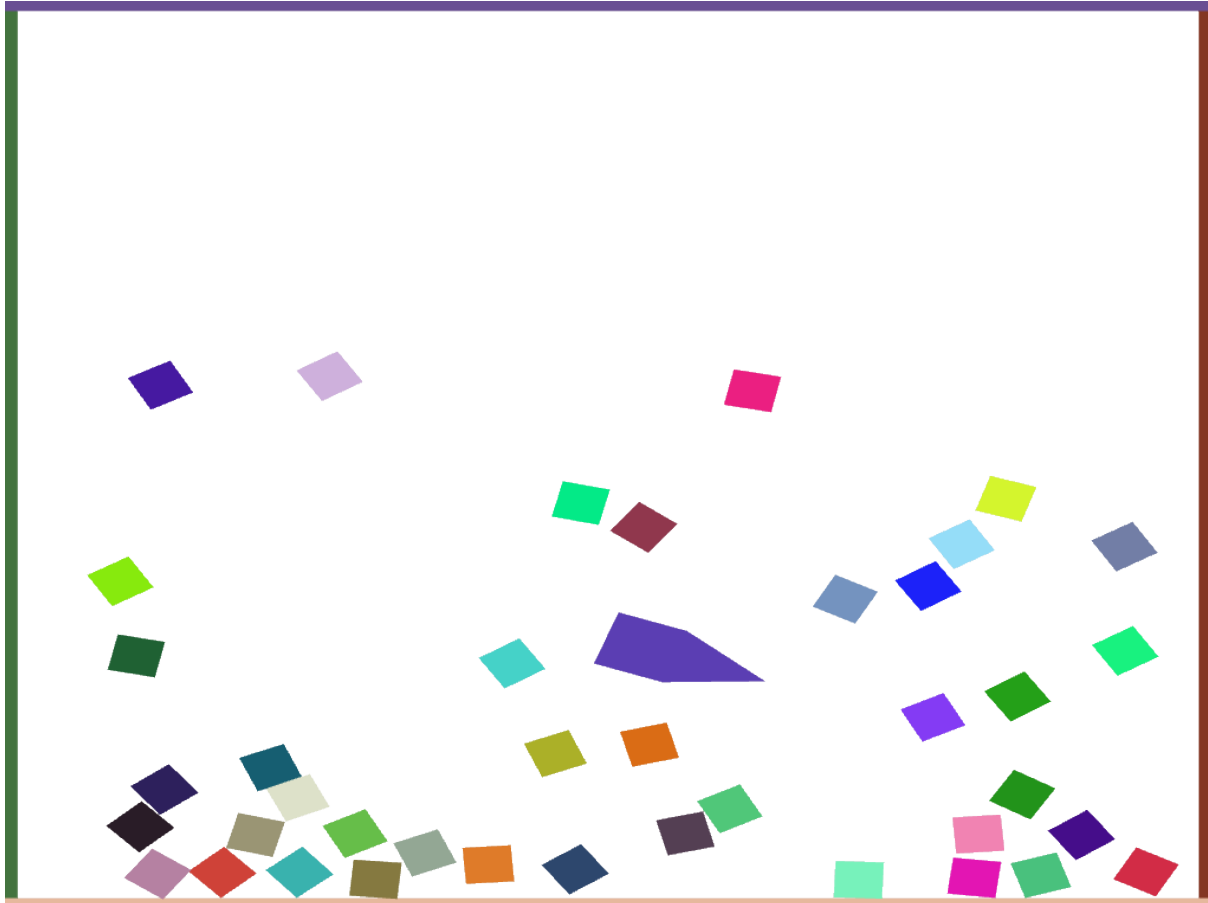
$$\bar{j}_r = \frac{|\bar{v}_r \cdot \bar{n}_\perp|}{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{1}{I_1}(\bar{r}_{1\perp} \cdot \bar{n}_\perp)^2 + \frac{1}{I_2}(\bar{r}_{2\perp} \cdot \bar{n}_\perp)^2} \quad (27)$$

Ekvation (27) kan jämföras med (impulsekvationen) som bygger på samma princip.

8 Resultat

Under projektet har en prototyp till en fysikmotor utvecklats. Motorn kan lösa ett antal sofistikerade uppsättningar av konvexa stelkroppar och producera trovärdiga resultat. Exempel på detta är:

- Energibevarande kollisioner med translation och rotation (Figur 5)
- Vilande kroppar (Figur 6)
- Komplexa massa-fjäder-system (Figur 7)
- Kollisionsdetektion för godtyckliga konvexa objekt

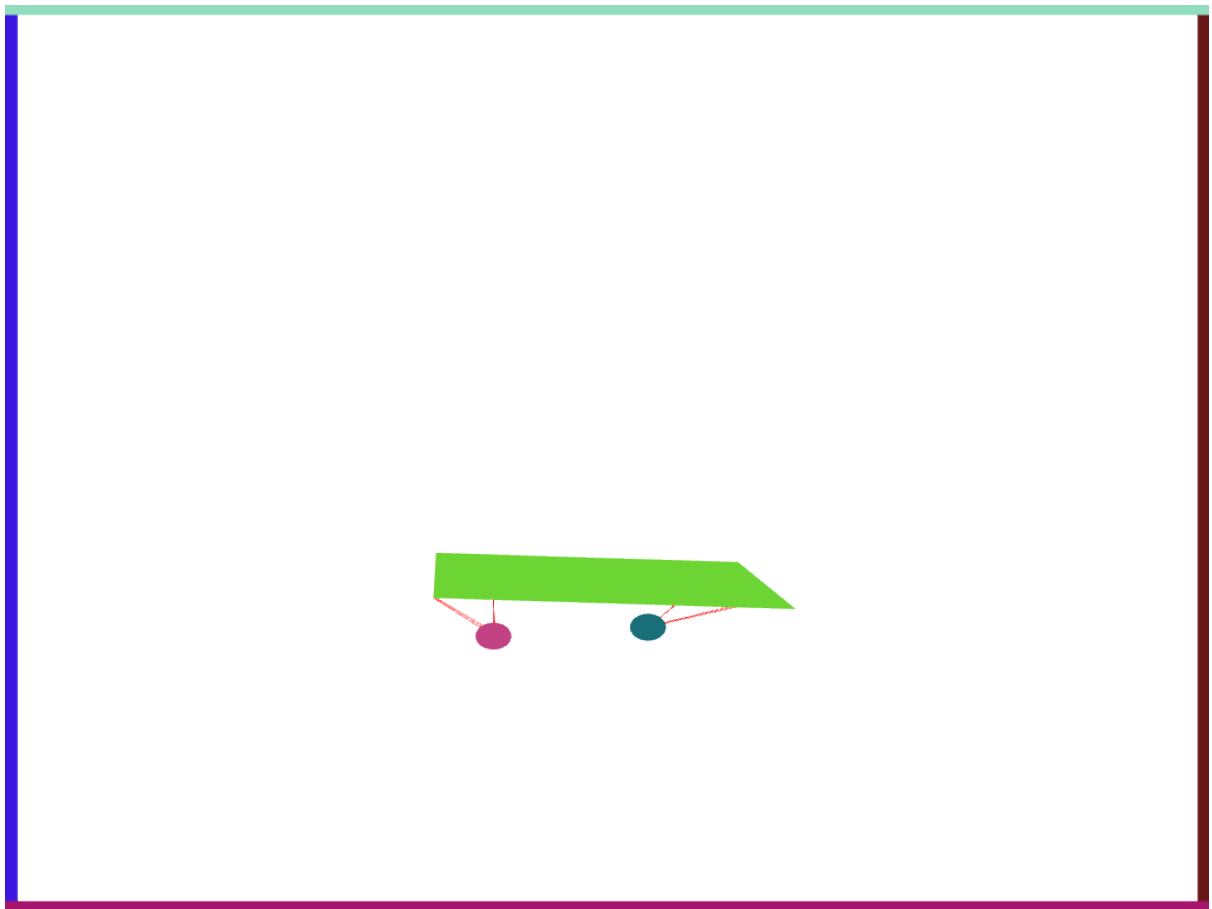


Figur 5: Energibevarande kollisioner

9 Diskussion



Figur 6: Vilande kroppar



Figur 7: Massa-fjäder-system

Referenser

- [1] Vella Colin, *Gravitas: An extensible physics engine framework using object-oriented and design pattern-driven software architecture principles*. 2008.
- [2] Millington Ian, *Game Physics Engine Development*. 2007.
- [3] Van den Bergen Gino, *A Fast and Robust GJK Implementation for Collision Detection of Convex Objects*, *Journal of Graphics Tool*. 4:2, 7-25, 1999.
- [4] Newton, Isaac *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. 1687.