



LUND UNIVERSITY

Förflyttning vid utrymning en utvärdering av mätmetoder Nilsson, Daniel

2016

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):
Nilsson, D. (2016). *Förflyttning vid utrymning: en utvärdering av mätmetoder*. Brandteknik, LTH.

Total number of authors:
1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Förflyttning vid utrymning - en utvärdering av mätmetoder

Daniel Nilsson

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet

Fire Safety Engineering
Lund University
Sweden

Rapport 3197, Lund 2016

Rapporten har finansierats av Brandforsk



LUNDS UNIVERSITET
Lunds Tekniska Högskola

Förflyttning vid utrymning
- en utvärdering av mätmetoder

Daniel Nilsson

Lund 2016

Förflyttning vid utrymning – en utvärdering av mätmetoder

Movement during evacuation – an evaluation of measurement techniques

Daniel Nilsson

Report 3197

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG/TVBB--3197--SE

Number of pages: 24

Illustrations: Daniel Nilsson

Keywords

Evacuation, movement, video camera, laser scanner, triangulation.

Sökord

Utrymning, förflyttning, videokamera, laserskanner, triangulering.

Abstract

Accurate measurement of people's movement patterns during evacuation requires appropriate data collection methods. This study examines three different methods, namely cameras placed above the crowd, triangulation using two cameras and distance measurements with laser scanners. Experiments were performed both in the laboratory and the field in order to evaluate the different methods. The results suggest that triangulation is a promising method that can yield movement pattern data with reasonable accuracy even for situations with low camera resolution and long distances between the cameras and the crowd. Laser scanners can also be used to get valuable data. One limitation is the scan frequency, which needs to be sufficient to yield data with high resolution. It is suggested that future research focus on improving the triangulation and laser scanner methods.

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2016.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se>

Telefon: 046 - 222 73 60

Department of Fire Safety Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se>

Telephone: +46 46 222 73 60

Förord

Följande rapport är en del av projektet *Förflyttning vid utrymning* (201-071) som finansierats av Brandforsk. Brandforsk stödjer forskning inom brandområdet och är ett gemensamt organ för staten, industrin och försäkringsbranschen.

Projektets fokus har alltid varit insamling av detaljerad förflyttningsdata vid utrymning, men tidigt i projektet blev det klart att det saknades lämpliga metoder för att samla denna typ av data. Projektet kom därför tidigt att inriktas främst på att utvärdera olika mätmetoder. I samband med denna utvärdering samlades det in mycket förflyttningsdata. All data har inte redovisats i denna rapport, men den finns sparad för de som är intresserade av att använda den.

Flertalet personer har varit till stor hjälp under projektets gång. Jag skulle därför vilja ta tillfället i akt att tacka alla inblandade personer för deras bidrag. Ett stort tack riktas till Håkan Frantzich för utmärkt handledarskap under inledningsfasen av projektet och för allt stöd efter min doktorsexamen. Dessutom vill jag tacka Emil Berggren för all assistans i samband med försöken på IKEA. Ett stort tack riktas även till kursdeltagarna i *utrymning vid brand* för deras insatser med att analysera materialet från ett av försöken i V-huset.

På grund av min tidigare arbetssituation har projektet dragit ut på tiden. Jag vill därför passa på att tacka Per-Erik Johansson och Brandforsks styrelse för deras tålamod. Jag vill även tacka min nuvarande avdelningschef Patrick van Hees för att han gjort det möjligt för mig att fullfölja projektet. Tack vare Patrick kunde jag minska min undervisningsinsats på avdelningen och återigen satsa mer på forskning.

Nu är slutligen projektet klart och jag är redo för nya forskningsutmaningar!

Lund, 28 februari 2016

Daniel Nilsson

Sammanfattning

Utvecklingen av framtidens datorbaserade utrymningsmodeller bygger på att det finns detaljerad data om personers förflyttning vid utrymning. För att kunna samla denna typ av detaljerad data krävs lämpliga mätmetoder. Traditionellt har videofilmning ovanifrån ofta används, men denna metod är förknippad med begränsningar. Alternativa metoder hade därför potentiellt kunnat användas för att ge noggrannare mätresultat och bidra till smidigare datainsamling.

Syftet med det genomförda projektet är att undersöka och utvärdera möjliga mätmetoder för insamling av detaljerad data om förflyttning vid utrymning. Vidare är målet är att föreslå några mätmetoder som kan vidareutvecklas i framtida forskning.

Projektet inleddes med en inventering av möjliga mätmetoder för dokumentering av förflyttning vid utrymning. Utifrån denna inventering valdes tre metoder ut för vidare studier, nämligen filmning ovanifrån, triangulering med två kameror och laserskannrar. Dessa mätmetoder utvärderades sedan i laboratorieförsök på Lunds Tekniska Högskola och ett fältförsök på IKEA i Helsingborg.

Resultaten från försöken visar att den traditionella metoden, dvs filmning ovanifrån, är förknippad med svårigheter. Exempelvis kan det vara svårt att bestämma personers position med hjälp av fötternas placering vid hög persontäthet. Om man istället använder nackens eller huvudets position finns det istället risk för stora mätfel.

Triangulering med två kameror visade sig vara en metod med stor potential. I laboratorieförsöken kunde metoden användas för att bestämma personers position med relativt hög noggrannhet trots låg upplösning och stora avstånd mellan kamerorna och försökspersonen. Även laserskannrar kan potentiellt användas, men ett problem är att skanningsfrekvensen måste vara hög. En etisk fördel med laserskannrar är dock att försökspersonerna inte kan identifieras med hjälp av insamlad data.

Det rekommenderas att framtida forskning fokuserar på utvecklingen av triangulering med två kameror och laserskannrar för uppskattning av personers förflyttning vid utrymning. Denna forskning bör speciellt inriktas på hur dessa metoder kan användas för att minska det manuella arbetet vid analys av insamlat material.

Innehållsförteckning

1. INLEDNING	1
1.1. MÅL OCH SYFTE	2
1.2. METOD	2
1.3. AVGRÄNSNINGAR	2
2. MÄTMETODER	3
2.1. FILMNING OVANIFRÅN	3
2.2. TRIANGULERING MED TVÅ KAMEROR	5
2.3. LASERSKANNER	5
3. LABORATORIEFÖRSÖK – TRIANGULERING MED TVÅ KAMEROR	7
3.1. FÖRSÖKSPERSONER	7
3.2. FÖRSÖKSUPPSTÄLLNING	7
3.3. GENOMFÖRANDE	7
3.4. RESULTAT	8
3.5. DISKUSSION	9
4. LABORATORIEFÖRSÖK – PERSONFLÖDE GENOM UTGÅNG	11
4.1. FÖRSÖKSPERSONER	11
4.2. FÖRSÖKSUPPSTÄLLNING	11
4.3. GENOMFÖRANDE	12
4.4. RESULTAT	13
4.5. DISKUSSION	16
5. FÄLTFÖRSÖK PÅ IKEA	17
5.1. FÖRSÖKSPERSONER	17
5.2. FÖRSÖKSUPPSTÄLLNING	17
5.3. GENOMFÖRANDE	17
5.4. RESULTAT	18
5.5. DISKUSSION	20
6. SLUTSATSER	21

1. Inledning

Sedan mitten av 1950-talet har det genomförts en rad undersökningar för att ta reda på hur fort personer förflyttar sig på horisontellt underlag, uppför/nedför trappor och genom dörrar (Predtetschinski & Milinski, 1971; Togawa, 1955; Fruin, 1971; Pauls, 1988; Khisty, 1985). För flertalet av dessa studier samlades data in för situationer som inte var kopplade till brand eller utrymning. Ett undantag är Khisty (1985) som redovisar försök genomförda både i normalsituationer och vid utrymningsövningar. Khistys resultat visar att gånghastigheten är högre vid utrymning än i normalfallet. Detta hade man tidigare antagit, men det fanns inte mycket data som underbyggde antagandet.

Under 1980-talet genomfördes även en rad försök där personer med funktionsnedsättning eller hög ålder deltog (Hallberg & Nyberg, 1987; Dahlstedt, 1978). Dessa försök visade på den stora variation i gånghastighet som kan förväntas vid utrymning och pekar också på att det inte bara är gånghastighet som är väsentligt att beakta vid utrymning. Även utrymningsvägens fysiska utformning, t ex lätt öppningsbara dörrar och låga trösklar, är betydelsefull för att underlätta för personer med rörelsenedsättning. Detta verifieras också av många senare undersökningar (Brand & Sörqvist, 2000).

När möjligheterna att modellera utrymning med datorer ökade under 1980- till 1990-talet framkom det att människors beteende är av stor betydelse för utrymningen. Ett antal större oannonserade utrymningar genomfördes därför för att undersöka personers förberedelsestider (Proulx, Kaufmann & Pineau, 1996; Shields & Boyce, 2000; Frantzich, 2001). I samband med dessa försök kunde man också konstatera att personer inte alltid förflyttar sig så som förflyttningsanalyser tidigare hade förutsatt.

De modeller som finns idag för att beräkna utrymningstider baseras till stor del på de tidigare nämnda undersökningarna. Eftersom dessa modeller delvis använder ett underlag som inte så väl beskriver hur personer väljer att förflytta sig i en utrymningssituation finns det skäl att undersöka just detta. En av anledningarna till att bättre beskriva hur personer förflyttar sig är att utvecklingen av utrymningsmodeller har tagit ytterligare ett steg framåt och många modeller använder nu en agentbaserad strategi för beräkning.

I agentbaserade modell representeras varje person av en agent som kan programmeras att anpassa sin förflyttning baserat på andra agenter och omgivningen. Många av dagens utrymningsmodeller baseras dock på att agenterna väljer gånghastighet och riktning utifrån ett lokalt perspektiv, dvs hur det ser ut precis runt omkring varje modellperson (Thompson, Wu & Marchant, 1997; Mott MacDonald, 2006). Det leder till simuleringar som inte alltid beskriver hur den verkliga förflyttningen ser ut.

I agentbaserade modeller hade agenterna istället kunnat utnyttja förutsättningarna på en större yta och anpassa den individuella förflyttningen utifrån omständigheterna, dvs planera sin förflyttning. Ett exempel på en brist är sättet på vilket många modeller hanterar kösituationer. Normalt fortsätter en agent att gå med oförminskad hastighet så länge persontätheten inte är för hög eller avståndet till framförvarande inte drastiskt krymper. Det gör att det i modellerna byggs upp köer som är mer kompakta än vad som kan observeras vid försök. Det som sker är nämligen att personer som utrymmer anpassar sitt rörelsemönster mycket längre ifrån ett eventuellt hinder, t ex en kö, eftersom personen inser att det inte tjänar något till att skynda sig fram för att istället stå i kö. Vid försök som genomfördes på LTH i ett

projekt finansierat av Räddningsverket observerades att personer anpassade sin hastighet när de såg att det uppstod en kö längre fram. Personer längre bak i kön började gå långsammare när de såg att det uppstod en förträngning framme vid en trång passage. Detta medförde i sin tur att det uppstod två regioner i kön, nämligen en region med hög persontäthet i närheten av förträngningen och en region med lägre persontäthet i köns mittersta del.

För att framtida agentbaserade utrymningsmodeller ska kunna utvecklas behövs detaljerad information om hur personer rör sig i olika situationer. Tidigare forskning har främst varit inriktad på att ta fram förflyttningshastigheter för olika populationer och konfigurationer. Denna forskning har bidragit till att man idag har förhållandevis god kunskap om hur fort personer går på plana underlag. Dessa uppmätta hastigheter är dock oftast medelhastigheter vid förflyttning. När en person går genom en byggnad kommer han eller hon att anpassa sin hastighet allt eftersom hinder dyker upp på vägen. Exempel på hinder är ett hörn som ska rundas, en dörr eller förträngning som personen ska gå igenom eller en mötande person som man ska undvika att krocka med. Denna anpassning av hastigheten kan även enligt tidigare observeras vid vissa kösituationer.

För att möjliggöra detaljerade analyser av personers förflyttning vid utrymning krävs lämpliga mätmetoder. Traditionellt har videofilmning ovanifrån används, men det är möjligt att alternativa metoder hade kunnat ge noggrannare resultat och bidra till smidigare datainsamling. Detta hade i sin tur medfört att lämplig data för utveckling av framtidens agentbaserade utredningsmodeller hade kunnat samlas i framtida forskningsprojekt.

1.1. Mål och syfte

Syftet med projektet är att undersöka och utvärdera möjliga mätmetoder för insamling av detaljerad data om förflyttning vid utrymning. Målet är att föreslå några mätmetoder som kan vidareutvecklas i framtida forskning.

1.2. Metod

Projektet inleddes med en inventering av möjliga mätmetoder för dokumentering av förflyttning vid utrymning, vilket ledde till att tre potentiella mätmetoder identifierades (se kapitel 2). Några mätmetoder utvärderades därefter i laboratorieförsök på Lunds Tekniska Högskola (se kapitel 3 och 4). Därefter genomfördes ett fältförsök på IKEA i Helsingborg där en mätmetod testades (se kapitel 5). Avslutningsvis drogs slutsatser om de studerade mätmetodernas lämplighet och förslag på framtida forskning gavs (se kapitel 6).

1.3. Avgränsningar

Personers förflyttning vid utrymning kan mätas på många olika sätt och det är inte möjligt att undersöka alla alternativ. Projektet har därför begränsats till att studera användningen av videokameror och laserskannrar. Dessa mätmetoder har dessutom bara utvärderats för ett urval av möjliga uppställningar.

2. Mätmetoder

Många genomförda forskningsprojekt har fokuserat på att undersöka olika mätmetoder för uppskattning av personers förflyttning (Boltes et. al., 2008; Clayton, Urquhart, & Kerridge, 2008; Meysel & Reulke, 2008; Rinne et. al., 2008; Walkow, 2006). Exempel på metoder är videofilmer (Meysel & Reulke, 2008), IR-sensorer (Clayton, Urquhart, & Kerridge, 2008) och RFID: Radio-Frequency IDentification (Rinne et. al., 2008). Många av dessa metoder kräver att bestämda förutsättningar gäller för att uppnå god mätnoggrannhet. Exempelvis kräver RFID att antenner placeras på utvalda platser och att sändare bärs av försökspersonerna. När kameror används måste dessa ofta placeras högt ovanför försökspersonerna och filma neråt för att minimera mätfelet.

En del metoder kommer inte att vara lämpliga att använda vid oannonserade utrymningsförsök eftersom förutsättningarna för hög mätnoggrannhet inte är uppfyllda. Det är t ex svårt att få personer att bära RFID-sändare om de inte informeras om försöket på förhand. Byggnadens takhöjd kan också försvåra exakta mätningar eftersom kamerorna måste placeras nära försökspersonerna, vilket t ex kräver att många kameror används. Det är möjligt att erhålla data om försökspersonernas placering och förflyttning även om kamerorna inte placeras direkt ovanför (Thompson, 2004), men detta kan ge upphov till stora mätfel (Nilsson & Petersson, 2008).

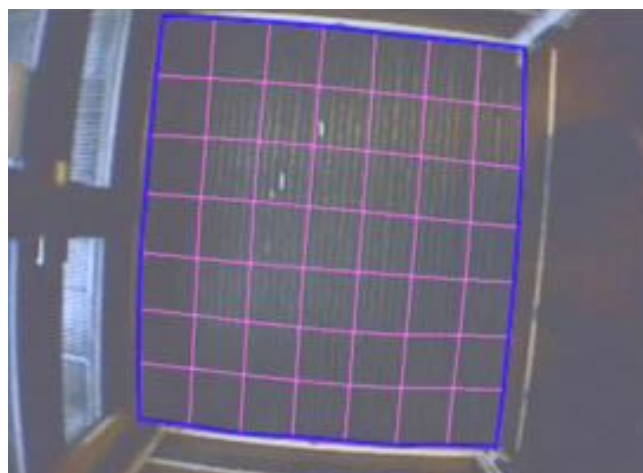
I nedanstående avsnitt behandlas först *filmning ovanifrån*, vilket är den metod som idag ofta används vid dokumentering av personers förflyttning vid utrymning. Därefter behandlas *triangulering med två kameror* och *laserskannrar*. Samtliga av dessa metoder användes i något av de försök som beskrivs i följande kapitel.

2.1. Filmning ovanifrån

Filmning ovanifrån är den metod som idag ofta används vid utrymningsförsök när detaljerad information om personers förflyttning ska samlas in. Metodens noggrannhet är relativt god om personernas fötter kan ses i de inspelade filmerna, men i vissa fall är detta inte möjligt pga exempelvis hög persontäthet. Ett alternativ är därför att istället bestämma positionen med hjälp av en kroppsdel som syns lättare i filmerna, t ex nacken eller huvudet på försökspersonerna.

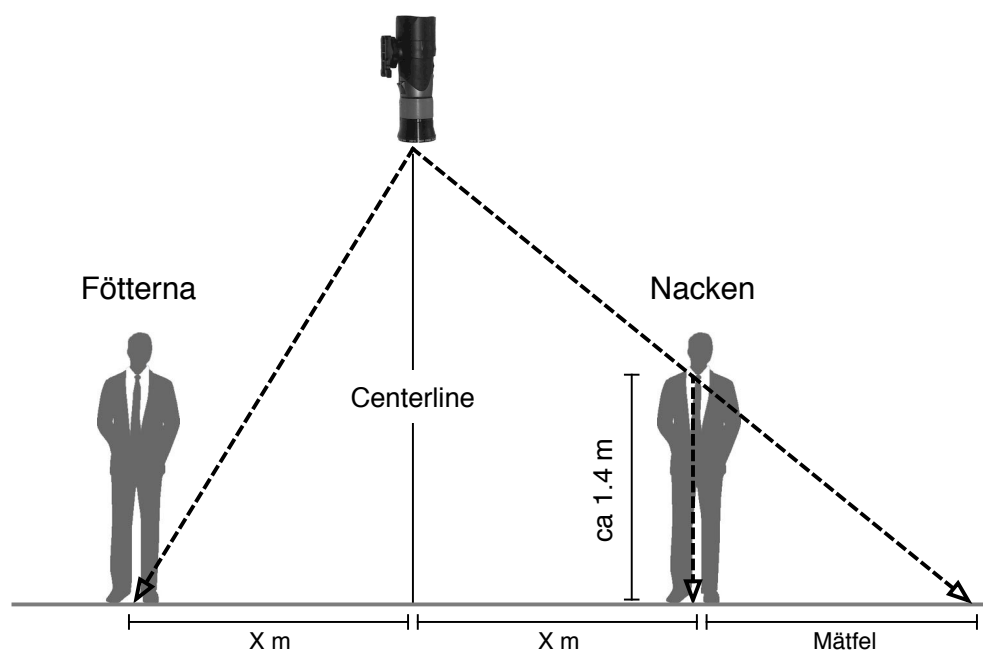
När videofilmning ovanifrån används behövs ett rutnät eller koordinatsystem för att personernas position ska kunna bestämmas. Ett vanligt angreppssätt är att ett rutnät markeras på golvet, t ex med tejp, och filmas innan försöket inleds. Därefter tas rutnätet bort och försöket inleds. När videofilmerna sedan analyseras läggs rutnätet till i ett videobehandlingsprogram i efterhand baserat på tejpbitarnas position (se figur 2.1). Detta rutnät kan sedan användas för att bestämma försökspersonernas position i filmerna.

Om försökspersonernas fötter kan ses i filmerna är det enligt tidigare förhållandevis lätt att bestämmas deras position och ofta antas positionen vara punkten mitt mellan fötterna. I de fall analysen istället utgår från nackens position uppstår ett mätproblem eftersom rutnätet är placerat i golvnivå och nacken är placerad ca 1,3 till 1,5 meter över golvet för en vuxen människa. Det går därför inte att direkt avläsa kroppens position med hjälp av rutnätet på grund av det mätfel som uppstår (se figur 2.2). Detta mätfel blir dock litet om kamerorna är placerade mycket högt ovanför personerna och det finns exempel på studier som genomförts utomhus där detta angreppssätt använts (Johansson, 2009).



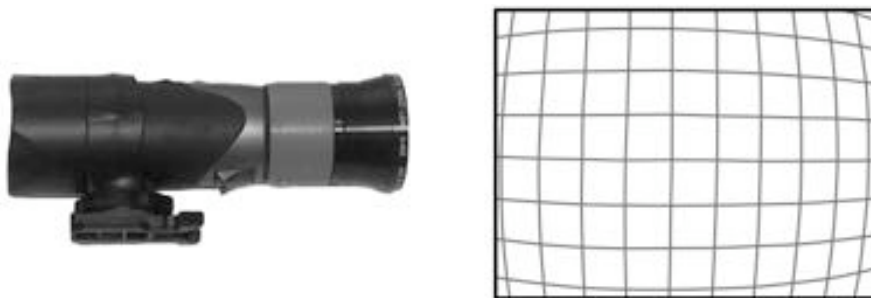
Figur 2.1 Ett exempel på ett rutnät som lagts till i efterhand i en videofilm

Eftersom utrymningsförsök ofta genomförs inomhus kan det vara svårt att placera kamerorna långt ovanför försökspersonerna. I detta fall kan mätfelet bli stort om inte hänsyn tas till att nacken och rutnätet är placerat på olika höjd. Genom att anta en höjd för nacken, t ex 1,4 meter, kan dock positionen uppskattas med relativt hög noggrannhet. Denna typ av antagande används i programmet Persias (Thompson, 2004). En begränsning med att anta en höjd är dock att denna inte stämmer för alla försökspersoner, vilket ger upphov till mätfel (Nilsson & Petersson, 2008).



Figur 2.2 Illustration av det mätfel som uppstår när nacken och rutnätet är placerat på olika höjder

På grund av den begränsade takhöjden i många byggnader används ofta kameror med vidvinkelobjektiv. Fördelen med dessa kameror är att de kan filma en större area, men nackdelen är att bilden och därmed rutnätet deformeras (se figur 2.3). Detta gör att personernas position kan bli svårare att bestämma exakt eftersom ett avstånd i bilden inte alltid motsvarar samma avstånd i verkligheten.



Figur 2.3 En actionkamera med vidvinkelobjektiv (vänster) och tillhörande deformerat rutnät (höger)

2.2. Triangulering med två kameror

En möjligt alternativ mätmetod är att använda två kameror och triangulering för att bestämma personers position. Metoden bygger på att samma punkt, dvs pixel, identifieras i två kameror, t ex nackens position. Därefter bestäms vektorerna i den fysiska miljön, dvs byggnaden, som motsvarar de identifierade pixlarna i filmerna. Personens position bestäms sedan genom att hitta den punkt där vektorerna möts, eller är närmast varandra, i den fysiska miljön. En fördel med detta angreppssätt är att information om placeringen i x-, y- och z-led kan bestämmas, vilket även gör det möjligt att t ex bestämma personernas höjd.

En förutsättning för att det ska gå att bestämma vektorer utifrån pixlar i filmen är att bildens deformation är känd. Deformationen kan beskrivas med en 3×3 -matris. Denna matris, vilken beskriver hur bilden omformas pga vidvinkelperspektivet, kan uppskattas genom att använda bilder från filmen då ett rutnät filmas (se figur 2.3). Utöver detta krävs även två matriser per kamera som beskriver deras rotation respektive translation i förhållande till ett koordinatsystem i den fysiska miljön. Med hjälp av dessa tre matriser kan sedan pixlar i filmerna göras om till vektorer i den fysiska miljön.

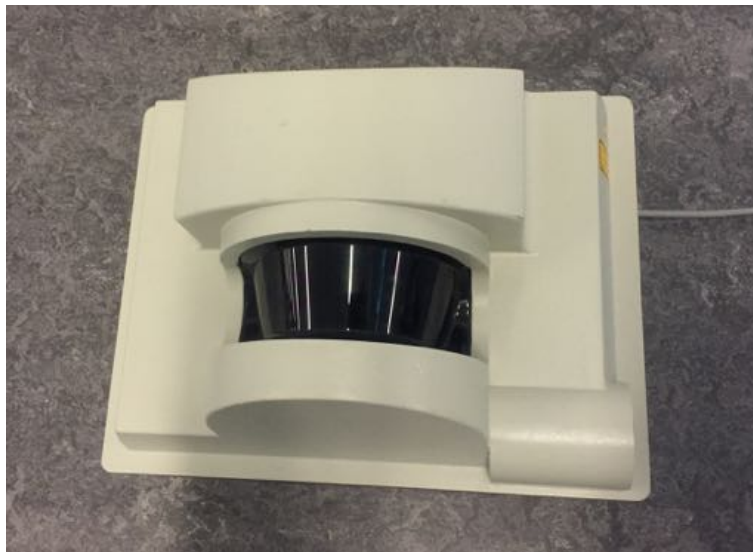
2.3. Laserskanner

Laserskannrar kan potentiellt användas som ett alternativ till kameror för att studera personers förflyttning vid utrymning. Ett exempel på en laserskanner är Sick LMS221 (Sick, 2010) som visas i figur 2.4. LMS221 mäter avståndet till hinder i ett tvådimensionellt plan med en maximal frekvens på 75Hz. Synfältet är 180° och mätnoggrannheten kan sättas till 0.25° , 0.5° eller 1.0° .

Principen för mätningarna är att en laserpuls skickas ut från skannern som sedan mäter tiden tills ljuset studsar tillbaka från hindret till skannern. Denna tid används sedan för att beräkna avståndet. Mätningarna sker i planet med hjälp av en roterande prisma som sitter inne i skannern. I LMS221 används en ögonsäker laser (laser kategori I), vilket innebär att skannern är säker att använda även i befolkade utrymmen.

Laserskannrar av typen LMS221 kan användas på lite olika sätt för att mäta personers förflyttning. En möjlighet är att placera skannern i bålhöjd framför personer och uppskatta hur de rör sig mot skannern. Personer syns då som en kontur som rör sig närmre och närmre skannern. Ett annat alternativ är att istället mäta ovanifrån. I detta fall kommer personerna att kunna identifieras eftersom avståndet till skannern minskar när de passerar under den. Det senare angreppssättet har tidigare använts av Walkow (2006) för att analysera personers förflyttning i trappor. I sin studie använde

Walkow två laserskannrar, vilket gjorde det möjligt för honom att inte bara se att personer passerade under skannern utan även uppskatta deras gånghastighet.



Figur 2.4 Laserskannern Sick LMS221

3. Laborieförsök – Triangulering med två kameror

Den 15 oktober 2009 genomfördes ett laborieförsök i foajén i V-huset, LTH. Syftet med försöket var att studera hur noggrant personers placering kan bestämmas med hjälp av triangulering med hjälp av bilder från två videokameror. Vid försöket användes två actionkameror med vidvinkelobjektiv. Upplösningen sattes till 240x320 pixlar, vilket är en upplösning som används i många utrymningsförsök för att försvåra identifiering av utrymmande personer.

3.1. Försökspersoner

I laborieförsöket undersöktes enbart mätnoggrannheten, varför endast en person deltog. Denna person var 176 cm lång och bar vanliga inomhuskläder (skor, jeans och en tjock tröja). Höjden till personens nacke, dvs den position i nacken där den tjocka tröjan slutade, var 150 cm.

3.2. Försöksuppställning

Försöket genomfördes framför den södra utgången i foajén i V-huset, LTH (se figur 3.1). I foajén monterades två actionkameror med vidvinkelobjektiv på höjden 230 cm över golvet (se figur 3.2). Dessa kameror vinklades ner mot den södra utgången.

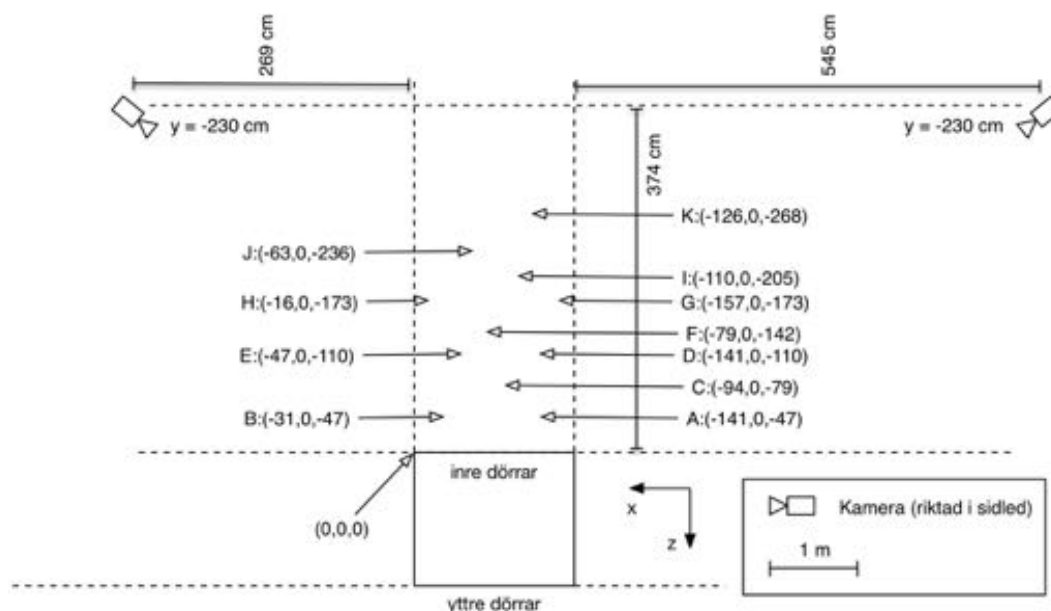


Figur 3.1 Den södra utgången i foajén i V-huset, LTH

3.3. Genomförande

Försöket inleddes med att kamerorna startades och inspelningen inleddes. Därefter ställde sig försökspersonen på utvalda platser, vilka är markerade med bokstäverna A till K i figur 3.2. Vid bokstäverna i figuren anges även koordinaterna (X,Y,Z) relativt origo (0,0,0). Koordinaterna gäller för en punkt mitt mellan fötterna för försökspersonen. I samband med försöket bestämdes även koordinaterna för sex referenspunkter i byggnaden. Dessa referenspunkter valdes så att de sågs av båda kamerorna.

Efter försöket extraherades bilder från videofilmerna för positionerna A till K (se figur 3.3). Med hjälp av ett bildbehandlingsprogram bestämdes pixelkoordinaterna (x,y) för fötternas och nackens placering i respektive bild. Dessutom bestämdes pixelkoordinaterna för de utvalda referenspunkterna.



Figur 3.2 Schematisk bild av försöksupställningen i foajén i V-huset, LTH

Trianguleringen inleddes med att kamerornas distortion bestämdes, vilket gjordes med hjälp av programmet *Camera Calibrator* i *MATLAB R2015b*. Med hjälp av distorsionen (uttryckt i form av en matris i *MATLAB*), koordinaterna för referenspunkterna och pixelkoordinaterna för referenspunkterna bestämdes sedan kamerans egenskaper (matriser för rotation och translation relativt koordinatsystemet i byggnaden). Därefter användes pixelkoordinaterna för position A till K från de två kamerorna tillsammans med kamerornas egenskaper och information om distorsionen för att uppskatta placeringen, dvs triangulering genomfördes.



Figur 3.3 Extraherade bilder från de två videofilmerna för position F

3.4. Resultat

Resultaten från försöket för position A till K redovisas i tabell 3.1. I tabellen ses både de faktiska och de med triangulering uppskattade koordinaterna. Dessutom redovisas avståndet i xz -planet (golvplanet) mellan de faktiska och de uppskattade koordinaterna, dvs mätfelet.

I tabellen kan det ses att mätfelet för positionerna A till K är större för placeringen *nacke* än för placeringen *fötter*. Mätfelet i xz -planet var i medeltal 9 cm för placeringen *fötter* och 20 cm för placeringen *nacke*.

Tabell 3.1 Resultaten från försöket för position A till K

Position	Placering	Koordinater (cm)			Uppskattade koordinater - triangulering (cm)			Måttel i xz-planet
		X	Y	Z	X	Y	Z	
A	fötter	-141	0	-47	-150	5	-39	10
A	nacke	-141	-155	-47	-152	-146	-32	14
B	fötter	-31	0	-47	-26	-4	-41	6
B	nacke	-31	-155	-47	-23	-150	-34	9
C	fötter	-94	0	-79	-96	6	-66	6
C	nacke	-94	-155	-79	-101	-147	-59	11
D	fötter	-141	0	-110	-152	6	-95	12
D	nacke	-141	-155	-110	-163	-146	-91	24
E	fötter	-47	0	-110	-43	2	-92	5
E	nacke	-47	-155	-110	-37	-149	-88	12
F	fötter	-79	0	-142	-76	7	-121	7
F	nacke	-79	-155	-142	-82	-145	-118	11
G	fötter	-157	0	-173	-166	9	-145	13
G	nacke	-157	-155	-173	-194	-143	-148	39
H	fötter	-16	0	-173	-4	4	-145	12
H	nacke	-16	-155	-173	8	-149	-147	25
I	fötter	-110	0	-205	-104	9	-171	10
I	nacke	-110	-155	-205	-130	-143	-177	24
J	fötter	-63	0	-236	-58	6	-198	8
J	nacke	-63	-155	-236	-71	-144	-205	13
K	fötter	-126	0	-268	-129	9	-225	10
K	nacke	-126	-155	-268	-166	-141	-229	43

3.5. Diskussion

Laborieförsöket visade tydligt att bilderna från två kameror kan användas för att bestämma personers placering i en byggnad. Trots att upplösningen var låg (240x320 pixlar) och kamerorna var placerade upp till sju meter från försökspersonen kunde personens placering bestämmas med en noggrannhet på upp till 9 cm. Noggrannheten var högre för placeringen *fötter* (9 cm) än för placeringen *nacke* (20 cm), vilket tros bero på att jämförelser gjordes med koordinaterna för en punkt mitt mellan fötterna på försökspersonen. Denna punkt är sannolikt förskjutet i xz-planet relativt nackens position, vilket kan förklara den sämre överensstämmelsen.

Försöken visar att triangulering är en metod med stor potential som sannolikt kan användas för att samla detaljerad förflyttingsdata vid utrymning i framtiden. Dock måste metoden vidareutvecklas för att uppnå högre precision, vilket t ex behövs när data om persontäthetens påverkan på förflyttingshastigheten ska samlas in.

4. Laborieförsök – Personflöde genom utgång

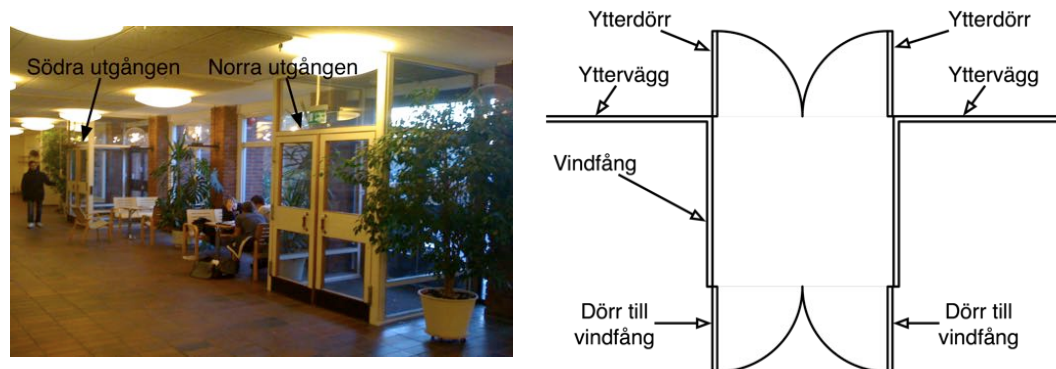
Den 26 november 2009 genomfördes laborieförsök i foajén i V-huset, LTH. Vid försöket användes åtta actionkameror med vidvinkelobjektiv. Dessutom användes en laserskanner som placerades i taknivå ovanför försökspersonerna. Syftet med försöket var att studera hur noggrant personers placering kan bestämmas med hjälp av en takmonterad laserskanner, men av okänd anledning sparades inte filerna från laserskannern korrekt och syftet kunde därför inte uppnås. Trots detta redovisas försöken nedan eftersom de kan användas i framtida studier för att undersöka personers förflyttning i grupp genom en öppning.

4.1. Försökspersoner

Totalt deltog 65 försökspersoner, vilka främst var studenter från brandingenjörsutbildningen samt civilingenjörsutbildningen i riskhantering. Försökspersonerna rekryterades via information på föreläsningar och anslag på anslagstavlor i V-huset, LTH. Alla försökspersoner fick en biocheck som tack för sin medverkan i försöket.

4.2. Försökupställning

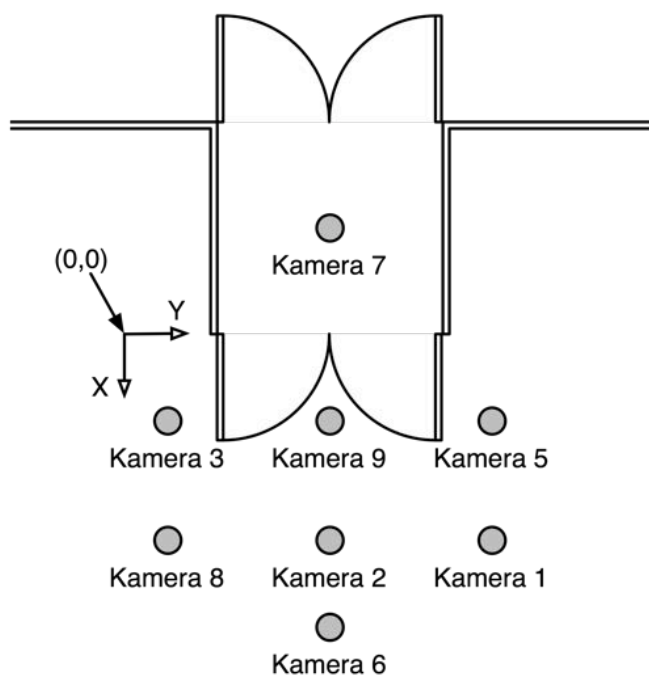
Försöket genomfördes vid den norra utgången i foajén i V-huset, LTH (se figur 4.1). Vid norra utgången finns ett vindfång med yttre slagdörrar (slagriktning utåt) av metall och glas, samt inre svängdörrar av trä och glas (kallade dörr till vindfång i figur 4.1). Vid försöket hölls de inre dörrarna öppna.



Figur 4.1 Foajén i V-huset (vänster) och en schematisk bild av den norra utgången som användes i försöket (höger).

Försöket dokumenterades med totalt åtta actionkameror (upplösning 640x480 pixlar) som monterades i taket och filmade rakt nedåt. Kamerornas placering och numrering framgår av figur 4.2. En laserskanner var monterad ovanför ingången till vindfånget. Enligt tidigare kunde data från skannern dock inte användas eftersom filerna inte sparades korrekt.

I foajén i V-huset består golvet av klinkerplattor som bildar ett rutmönster. Detta rutmönster användes som koordinatsystem vid analys av bildmaterialet från kamerorna.



Figur 4.2 Kamerornas placering i taket framför den norra utgången.

4.3. Genomförande

Försöket inleddes med att kamerorna startades och inspelningen inleddes. Därefter ställde sig försökspersonerna framför ingången till vindfånget. När de fick signal om att gå ut ur byggnaden började de förflytta sig ut via den norra utgången. Detta upprepades 15 gånger. Med jämna mellanrum varierades försökets förutsättningar, vilket resulterade i totalt fem försöksscenarioer (se tabell 4.1).

Tabell 4.1 Försökets fem scenarier

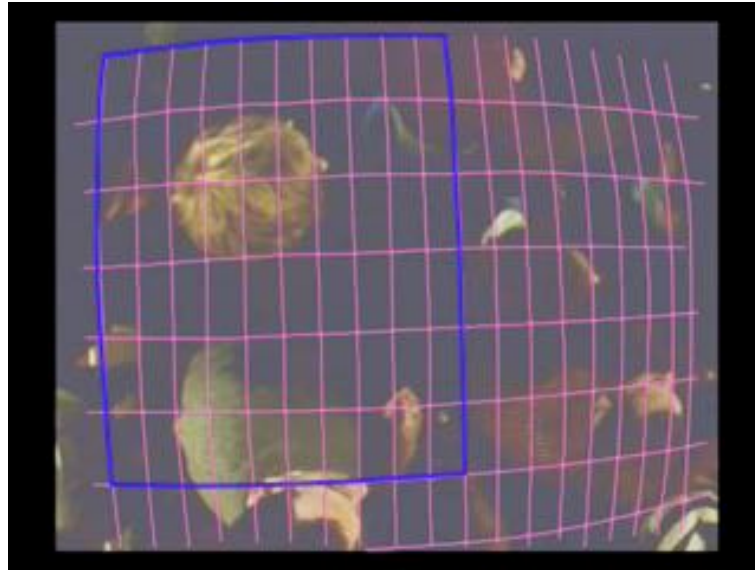
Scenario	Antal repetitioner	Inledande densitet	Bredd på öppning	Övriga anmärkningar
A	3	3,4 personer/m ²	80 cm	
B	3	3,4 personer/m ²	90 cm	
C	3	1,7 personer/m ²	90 cm	
D	3	3,4 personer/m ²	180 cm	Fyra vagnar användes
E	3	3,4 personer/m ²	180 cm	
Summa:	15			

I de flesta av scenarierna startade de 65 försökspersonerna i ett område med måtten 3,8 gånger 5,0 meter, vilket resulterade i en persontäthet på ungefär 3,4 personer per kvadratmeter i början av försöket. Dock användes en större area i scenario C, vilket resulterade i en inledande persontäthet på ungefär 1,7 personer per kvadratmeter. I scenario A till C användes enbart en av de yttre slagdörrarna. Dessutom placerades en träregel vid vänster dörrkarm i scenario A, vilket reducerade den fria bredden till 80 cm. I scenario D och E användes båda de yttre slagdörrarna. Dessutom var det fyra försökspersoner som körde vars en mindre vagn i scenario D. Försökspersonerna fick genomföra varje scenario tre gånger, dvs det genomfördes tre repetitioner per scenario.

Efter försöket analyserades videofilmerna. Samtliga scenarier analyserades övergripande. Exempelvis fastställdes det absoluta och specifika flödet genom den norra utgången för samtliga scenarier. Endast scenario A analyserades mer ingående. För detta scenario uppskattades personers förflyttning, dvs deras koordinater som

funktion av tiden, från startpositionen till dess att de kommit ut ur byggnaden för den första repetitionen. Uppskattningen utgick från rutnätet i golvet, dvs klinkerplattorna. Försökspersonernas position antogs vara den punkt som låg mitt mellan deras fötter.

Den ingående analysen var svår att genomföra eftersom bildkvaliteten och personantalet avsevärt försvårade bestämningen av personernas position. Exempelvis var fötterna mycket svåra att urskilja eftersom personerna stod nära varandra och därför skymde sikten (se figur 4.3). Dessutom var belysningsnivån begränsad vid golvnivå, vilket gjorde det mycket svårt att urskilja några detaljer (se figur 4.3). Av denna anledning är mätningarna förknippade med stora osäkerheter.



Figur 4.3 Ett exempel på en svåranalyserad film från kamera 3

I vissa fall var det lättare att urskilja positionen på grund av exempelvis avvikande färg på kläder och skor, vilket anses ha medfört större noggrannhet på mätvärdena. I följande rapport redovisas därför enbart resultaten för två personer som var lätta att följa. För dessa två personer mättes även nackens koordinater, vilket används i nästa avsnitt för att visa storleksordningen på mätfelet om hänsyn inte tas till att rutnätet och nacken är på olika höjd.

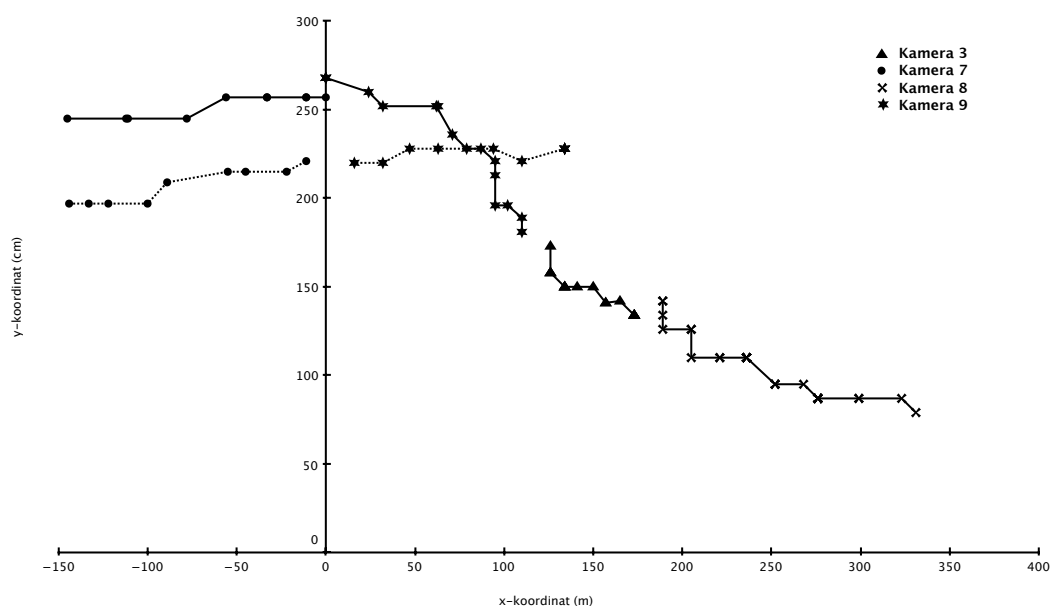
4.4. Resultat

Flödet genom den yttre öppningen i de fem scenarierna, inklusive alla repetitioner, redovisas i tabell 4.2. Enligt vad som kan ses i tabellen ligger det specifika flödet i spannet 1,2 till 1,8 personer per sekund och meter. Det kan ses i tabellen att flödet kan skilja en del mellan olika repetitioner inom ett specifikt scenario. Även om skillnaderna i specifikt flöde är relativt lågt mellan scenarier, antyder resultaten att flödet blev lägre när vagnar användes (jämför scenario D och E) och när den initiala persontätheten var lägre (jämför scenario B och C). Dock har inga statistiska tester genomförts för att bekräfta att de observerade skillnaderna är signifikanta.

Tabell 4.2 Flödet i de fem scenarierna inklusive ingående repetitioner

Scenario	Repetition	Tid (s)	Antal personer	Bredd (m)	Flöde (pers/s)		Specifikt flöde (pers/s/m)		
					Repetition	Scenario	Repetition	Scenario	
A	1	42,2	65	0,8	1,54	1,42	1,93	1,78	
	2	45,0	65	0,8	1,44		1,81		
	3	50,4	65	0,8	1,29		1,61		
B	1	40,4	65	0,9	1,61	1,54	1,79	1,71	
	2	41,9	65	0,9	1,55		1,72		
	3	44,4	65	0,9	1,46		1,63		
C	1	43,9	65	0,9	1,48	1,43	1,65	1,59	
	2	46,6	65	0,9	1,39		1,55		
	3	45,8	65	0,9	1,42		1,58		
D	1	26,7	65	1,8	2,43	2,20	1,35	1,22	
	2	30,5	65	1,8	2,13		1,19		
	3	31,9	65	1,8	2,04		1,13		
E	1	25,5	65	1,8	2,55	2,62	1,41	1,46	
	2	24,0	65	1,8	2,70		1,50		
	3	24,9	65	1,8	2,61		1,45		
Medel:								1,55	

I figur 4.4 visas förflyttningen, dvs punkten mitt mellan försökspersonernas fötter, för de två utvalda personerna i scenario A. Utgångens x-koordinat är -150 cm i figuren. Person 1 (streckad linje) var placerad framför ingången till vindfånget i början av försöket, medan den person 2 (heldragen linje) initialt var placerad i den bakre delen av gruppen med försökspersoner. I figuren anges även vilken kamera som använts för att bestämma positionen.

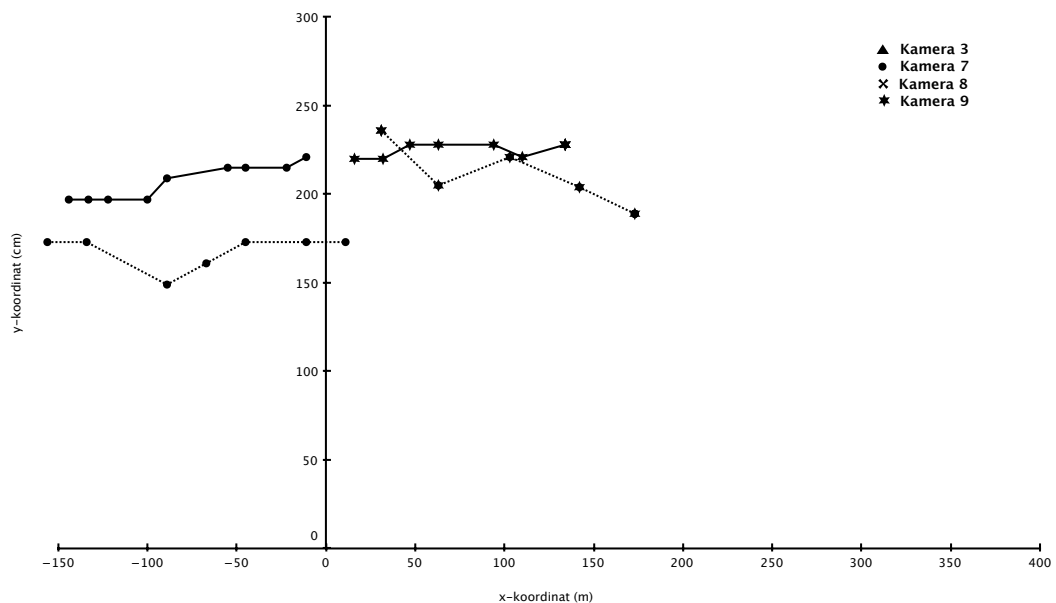


Figur 4.4 Två personers förflyttning i scenario A

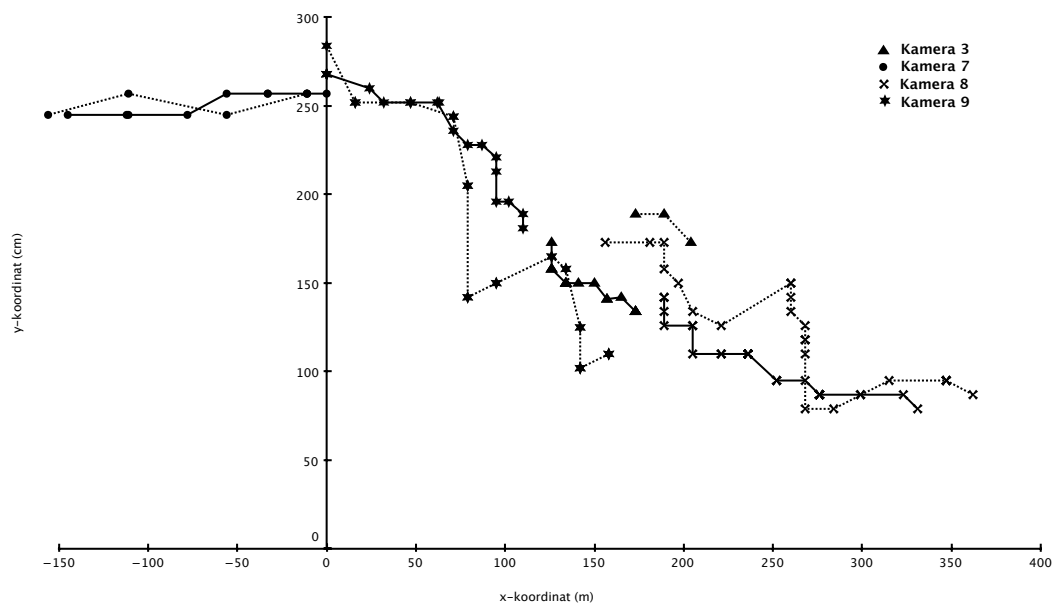
I figur 4.4 kan det ses att förflyttningen kunde bestämmas trots att personerna förflyttar sig mellan olika kameror. De två personerna valdes ut på grund av avvikande färg på kläder eller skor, vilket gjorde dem relativt lätta att följa. Förflyttningen i figur 4.4. kan därför anses vara relativt väl överensstämmande med den faktiska förflyttningen i försöket för dessa två personer.

Figur 4.5 och 4.6 visar skillnaden mellan uppskattad förflyttning när punkten mitt mellan fötterna (heldragen linje) och nacken (streckad linje) användes. Ingen korrigering har gjorts, utan nackens position har bestämts med hjälp av rutnätet i golvnivå. I figurerna kan det ses att skillnaderna blir stora om ingen kompensation

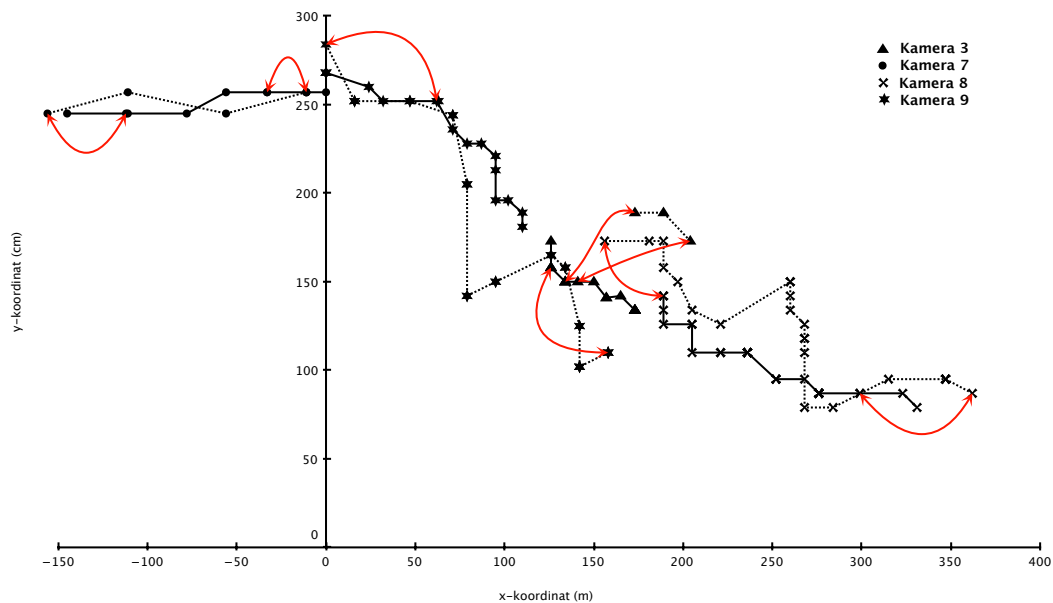
görs för att nacken är placerad ovanför rutnätet. Skillnaderna blir ännu tydligare om punkterna paras ihop tidsmässigt, vilket visas för person 2 i figur 4.7. I figuren har röda pilar dragit mellan utvalda punkter längs förflyttningen som är uppmätta vid samma tid, dvs då försöksperson 2 står på samma ställe.



Figur 4.5 Uppskattad förflyttning för person 1 med hjälp av punkten mellan fötterna (heldragen linje) och nackens position (streckad linje)



Figur 4.6 Uppskattad förflyttning för person 2 med hjälp av punkten mellan fötterna (heldragen linje) och nackens position (streckad linje)



Figur 4.7 Uppskattad förflyttning för person 2 med hjälp av punkten mellan fötterna (heldragen linje) och nackens position (streckad linje), samt den tidsmässiga kopplingen mellan positioner (röda pilar)

4.5. Diskussion

Försöken visar att det relativt enkelt går att erhålla övergripande information, t ex flöden genom öppningar, med hjälp av laboratorieförsök, men att en mer ingående analys av personers förflyttning kan vara förknippad med svårigheter. Om försökspersonerna filmas från ovan kan det vara svårt att se fötternas position eftersom de skymmer varandras fötter vid höga personstätheter. Dessutom skymmer personerna golvet från infallande ljus, dvs de kastar en skugga, vilket gör att ljusnivån vid golvet låg. Detta gör i sin tur att det är svårt att urskilja detaljer i videofilmerna. Om försökspersonerna bär avvikande kläder eller skor, t ex vita skor mot ett svart golv, blir analysen lättare.

En möjlighet är att istället bestämma försökspersonernas position med hjälp av en punkt som lättare ses i filmerna, t ex deras nacke. Detta kräver att forskaren använder ett rutnät på rätt höjd, t ex på den höjd där de flesta försökspersoners nacke förväntas befinna sig, eftersom det blir stora fel om analysen utgår från ett rutnät i golvnivå. Detta fel blir dock mindre ju längre ifrån försökspersonerna som kameran placeras, men i många fall är detta avstånd begränsat av takhöjden i byggnaden.

5. Fältförsök på IKEA

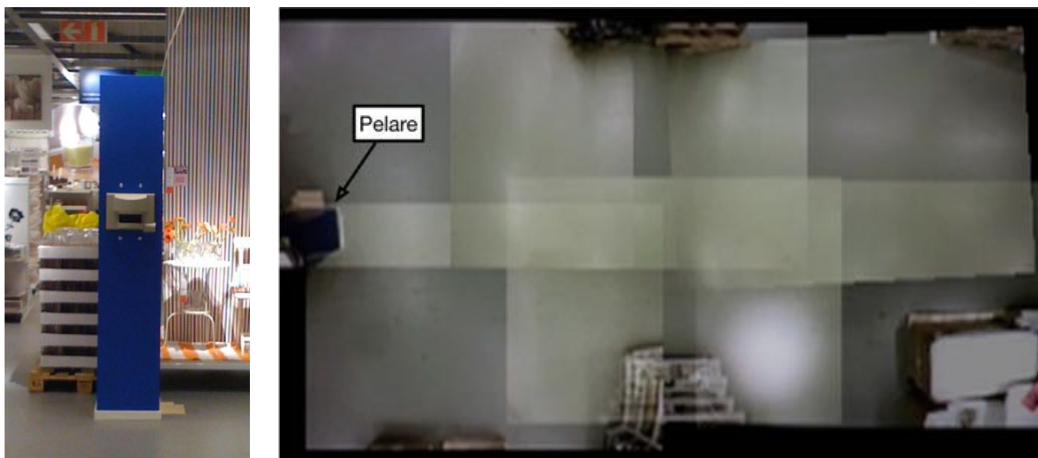
Den 5 maj 2009 genomfördes ett fältförsök på IKEA i Helsingborg. Syftet med försöket var att studera om en laserskanner kan användas för att studera utrymmande personers förflyttning vid utrymning. Vid försöket monterades sex actionkameror med vidvinkelobjektiv i taknivå och en pelare med en laserskanner placerades i gångstråket.

5.1. Försökspersoner

Försöket genomfördes på IKEA i Helsingborg under eftermiddagen den 5 maj 2009 och försökspersonerna bestod av vanliga IKEA-besökare. Försöket genomfördes i samband med en oannonserad utrymningsövning, vilket innebär att varken besökare eller personal kände till att försöket skulle genomföras. Totalt passerades pelaren av en person i rullstol, sex personer med kundvagn och elva personer som bar IKEA-kassar eller inget alls. Dessutom befann sig två personer från IKEAs personal i området framför pelaren under en del av utrymningsförloppet.

5.2. Försöksuppställning

Försöksuppställningen bestod av en bit av gångstråket nära kassorna på IKEA i Helsingborg. I mitten av gångstråket placerades en pelare med en laserskanner (Sick LMS 221) som mätte avståndet till hinder och de personer som gick mot pelaren (se figur 5.1). Skannern var placerad i samma höjd som bålen för majoriteten av befolkningen (130 cm över golvnivå).



Figur 5.1 Pelaren med laserskanner (vänster) och bilderna från de sex actionkamerorna (höger)

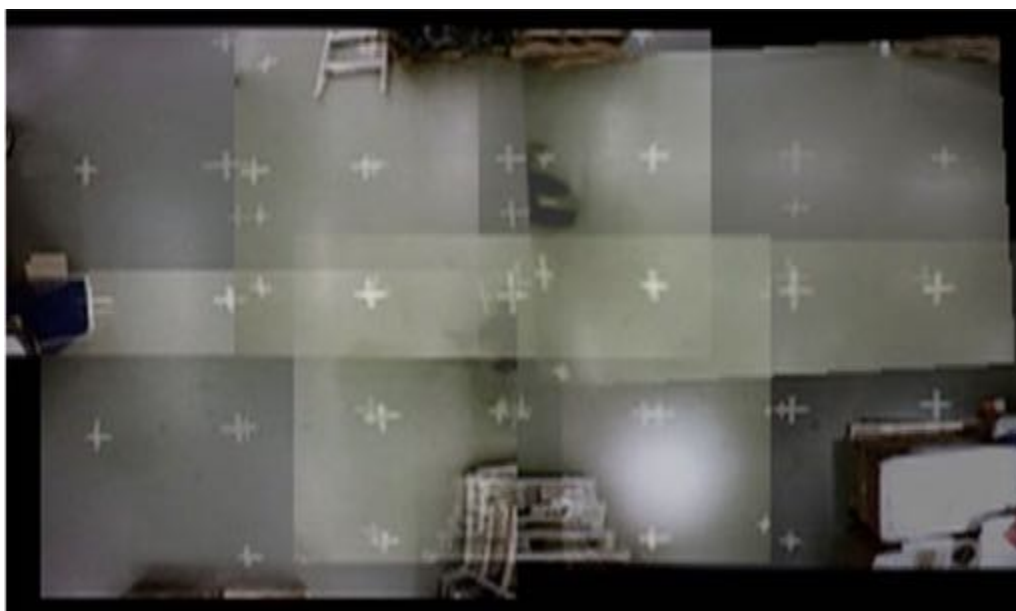
I taket ovanför gångstråket placerade sex actionskameror som filmade neråt (se figur 5.1). Upplösningen sattes till 160x120 pixlar, vilket är en upplösning som används i många utrymningsförsök för att försvåra identifiering av utrymmande personer.

5.3. Genomförande

Förberedelserna inleddes med att pelaren placerades i gångstråket, varefter de sex kamerorna monterades i taket. Därefter fästes tejp på golvet enligt ett förutbestämt mönster (se figur 5.2). Mönstret bestod av kryss med det inbördes avståndet 1,0

meter. Utgångspunkten för mönstret var mitten av pelaren. Dessutom gjordes kryss på golvet för att markera kamerornas placering.

När mönster var klart startades alla kameror och mönstret filmades (se figur 5.2). Filmningen av mönstret gjordes för att senare kunna användas som referens vid uppskattning av personers placering. I nästa steg startades laserskannern. Därefter inleddes den oannonserade utrymningsövningen genom att larmet i byggnaden startades. Larmet bestod av ett förberedelsealarm till personalen, vilket följdes av ett utrymningslarm till kunderna. Under hela utrymningsförloppet filmades området framför pelaren och laserskannern samlade data om avståndet till hinder eller personer framför pelaren. Data från laserskannern erhöles ca en till två gånger per sekund (samtliga värdet för 180°).



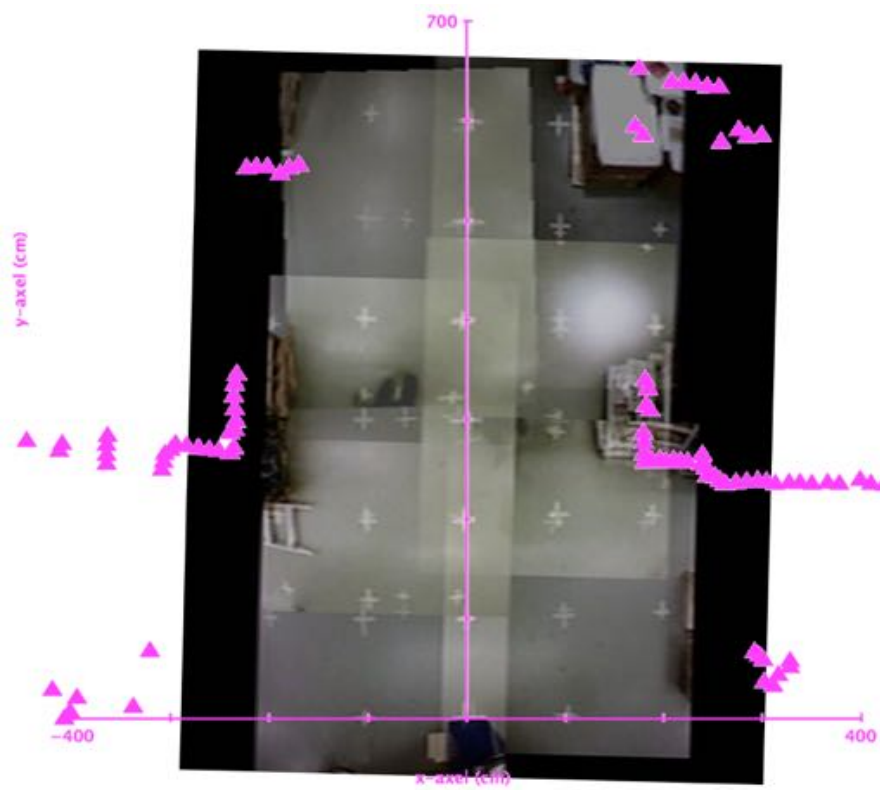
Figur 5.2 Bilderna från de sex actionkamerorna med mönstret i golvet

5.4. Resultat

Resultaten visar att avstånden uppmätta med laserskannern stämmer relativt väl överens med de avstånd som kan uppskattas från videofilmerna. I figuren nedan (se figur 5.3) ses uppmätta avstånd från laserskannern som färgglada trianglar i ett koordinatsystem som utgår från pelarens mitt. I figuren ses även bilderna från alla kameror tillsammans med det tidigare nämnda mönstret. Det kan ses i figuren att hindren, t ex hyllor med varor, kan urskiljas med hjälp av avståndsdata från laserskannern.

I nästa figur ses avståndsdata för en person tillsammans med bilderna från alla kameror (se figur 5.4). Det kan ses i figuren att laserskannern uppskattar personens placering med god noggrannhet.

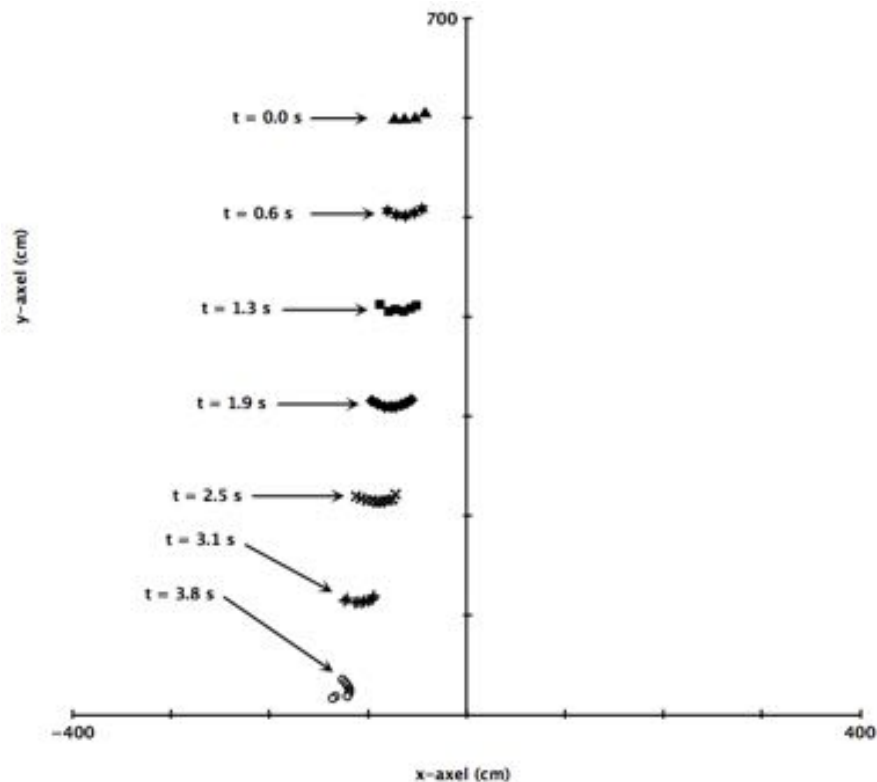
Det var även möjligt att följa personer vid förflyttning i försöket, vilket illustreras av figur 5.5. I figuren har tiden från första avståndsmätningen, dvs på personen befinner sig ungefär sex meter från pelaren, angivits för de olika mätpunkterna. Utifrån figuren kan personens förflyttningshastighet förbi pelaren uppskattas till ungefär 1,5 m/s (ca 5,8 meter tillryggäläggs på 3,8 sekunder).



Figur 5.3 Exempel på data från laserskannern utan människor



Figur 5.4 Exempel på data från laserskannern när en försöksperson går framför pelaren



Figur 5.5 Exempel på data från laserskannern för en person som förflyttar sig mot pelaren

5.5. Diskussion

Fältförsöket på IKEA i Helsingborg visade att en laserskanner som mäter avståndet till personer i ett horisontellt plan kan användas för att bestämma personers placering och förflyttning vid utrymning. En förutsättning för att metoden ska fungera är dock att persontätheten är relativt låg, vilket den också var i försöket. Om personstätheten är hög finns det risk att endast de personer som befinner sig närmast ses av skannern. I detta fall kan viss värdefull data trots allt erhållas, t ex måtten på den buffertzonen (eller outnyttjade utrymme) som uppstår framför olika typer av hinder vid förflyttning.

I försöket erhöles data från skannern mellan en och två gånger per sekund. Denna frekvens var tillräckligt hög för det aktuella försöket, men en högre frekvens hade gett mer detaljerad data. Dock var det inte möjligt att inom ramen för projektet öka frekvensen på mätningarna på grund av svårigheter att lösa kommunikationen mellan skannern och datorn.

6. Slutsatser

Bestämning av försökspersoners förflyttning, dvs deras position när de rör sig genom en byggnad, med traditionella metoder, dvs kameror placerade rakt ovanför personerna, är förknippat med svårigheter. Exempelvis kan det vara svårt att bestämma positionen med hjälp av fötternas placering vid hög persontäthet (se kapitel 4). Ett möjligt alternativ är att använda bilderna från två kameror och bestämma positionen med triangulering. Denna metod kan användas för att uppskatta försökspersoners placering med relativt god noggrannhet trots låg upplösning på filmerna och långa avstånd till försökspersonerna (se kapitel 3). Ett annat alternativ är att använda en laserskanner som mäter avståndet till hinder och försökspersoner. Denna metod kan användas för att mäta personers förflyttning vid utrymning (se kapitel 5) utan att de kan identifieras. Dock är en begränsning att skanningsfrekvensen måste vara relativt hög för att uppnå tillfredställande mätnoggrannhet.

Utifrån studiens resultat rekommenderas att framtida forskning fokuserar på att utveckla triangulering med två kameror och laserskannrar för uppskattning av personers förflyttning vid utrymning. Framtida forskning bör speciellt fokusera på hur dessa metoder kan användas för att minska det manuella arbetet, dvs hur sammanställning och analys av insamlat material kan automatiseras.

Referenser

- Boltes, M., Seyfried, A., Steffen, B., & Schadschneider, A. (2008) Automatic extraction of pedestrian trajectories from video recordings. Abstract - *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, pp 29-30.
- Brand, A. & Sörqvist, M. (2000) *Utrymnings säkerhet för rörelsehindrade*. Rapport 5071, Lund: Brandteknik, Lunds universitet
- Clayton, S., Urquhart, N., & Kerridge, J. (2008) Real-time pedestrian tracking using an array of low-cost infrared sensors. Abstracts - *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, pp 15-16.
- Dahlstedt, S. (1978) *Långsamma fotgängare – Pensionärers gånghastighet och promenadvanor*. Rapport R2, Stockholm
- Frantzich, H. (2001) Occupant Behaviour and Response Time – Results from Evacuation Experiments. *Human Behaviour in Fire - Proceedings of the Second International Symposium*, Boston, USA, pp 159-165.
- Fruin, J.J. (1971) *Pedestrian planning and design*. New York: Metropolitan association of urban designers and environmental planners inc.
- Hallberg, G. & Nyberg, M. (1987) *Utrymnings säkerhet i servicebus*. Rapport R3:1987, Stockholm: Byggnadsfunktionslära, KTH.
- Johansson, A.F. (2009) *Data-Driven Modeling of Pedestrian Crowds*, Faculty of Traffic Sciences, Technische Universität Dresden, Dresden, Germany.
- Khisty, C.J. (1985) Pedestrian flow characteristics on stairways during disaster evacuation. *Transport research record*, 1047, 97-102.
- Meysel, F. & Reulke, R. (2008) Automated multi-camera pedestrian dynamics acquisition and analysis. Abstract - *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, pp 33-36.
- Mott MacDonald (2006) *STEPS – Simulation of Transient Evacuation and Pedestrian movementS – User Manual*. Croydon: STEPS – Simulation Group – Transportation, Mott MacDonald.
- Nilsson, J. & Petersson, R. (2008) Utvärdering av videoanalysetoder för gångvägar med tillämpning på hörn [Evaluation of video analysis techniques and applied to movement around corners], Report 5256, Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Pauls, J. (1988) Movement of people. *The SFPE Handbook of protection engineering*, Boston: SFPE
- Predtetschinski, V.M. & Milinski, A.I. (1971) *Personenströme in gebäuden – Berechnungsmethoden für die projektierung*. Berlin: Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik
- Proulx, G., Kaufmann A., & Pineau J. (1996) *Evacuation Time and Movement in Office Buildings*. Ottawa: National Research Council of Canada.
- Rinne, T., Hostikka, S., Paloposki, T., Korhonen, T., Saari, J., & Heliövaara, S. (2008) Application of RFID and video imaging on evacuation observations in offices and public buildings. *Fire Safety Science – Proceedings of the 9th International Symposium*, Karlsruhe, Germany, pp 329-340.
- Shields, T.J. & K.E. Boyce (2000) A study of evacuation from large retail stores. *Fire Safety Journal*, 35(1), 25-49.
- Sick (2010) *Laser Measurement Technology – LMS2xxx / LMS221 / Outdoor / Mid-Range – LMS221-30106*, Online Data Sheet, Retrieved 8 February, 2010, from <https://www.mysick.com/>
- Thompson, P., Wu, J., & Marchant, E. (1997) Simulex 3.0: Modelling Evacuation in Multi-Storey Buildings. *Fire Safety Science – Proceedings of the 5th International Symposium*, 725-736.

- Thompson, P. (2004) Simulex: simulated people have needs too, *Workshop on Building Occupant Movement During Fire Emergencies*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- Togawa, K. (1955) *Study on fire escape on the observation of multitude currents*. Tokyo: Building Research Institute, Ministry of construction.
- Walkow, K.F. (2006) *Empirische Querschnittsdaten von Fußgängerströmen: Erfassung und Analyse, Verwendung in der Verkehrsmodellierung und ökonomische Bedeutung*, Dresden: Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Technische Universität Dresden.