

# Physical activity recognition using a wearable accelerometer : new perspectives for energy expenditure assessment and health promotion

## Citation for published version (APA):

Bonomi, A. (2010). *Physical activity recognition using a wearable accelerometer : new perspectives for energy expenditure assessment and health promotion*. Universitaire Pers Maastricht. <https://doi.org/10.26481/dis.20101208abo>

## Document status and date:

Published: 01/01/2010

## DOI:

[10.26481/dis.20101208abo](https://doi.org/10.26481/dis.20101208abo)

## Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

## Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

## General rights

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.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.umlib.nl/taverne-license](http://www.umlib.nl/taverne-license)

## Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[repository@maastrichtuniversity.nl](mailto:repository@maastrichtuniversity.nl)

providing details and we will investigate your claim.

## Summary

Strategies for disease prevention often include guidelines on lifestyle changes encouraging participation in physical activity. However, determining what amount of physical activity is necessary for achieving specific health benefits has been hampered by the lack of objective and valid instruments for monitoring physical activity and the related physiological outcomes. This thesis is focused on analyzing the potential advantages offered by accelerometer-based physical activity recognition for improving the assessment of energy expenditure and understanding of the relationship between activity behavior and health.

Physical activity was measured with a tri-axial accelerometer able of recording the raw acceleration signal and determining activity counts, which is the sum of the rectified and integrated acceleration for each sensing axis. Automatic recognition of physical activity types was achieved using a decision tree algorithm capable of processing spectral and temporal features of the raw acceleration signal measured at the waist. The knowledge contained in the classification tree was developed with a training dataset collected during laboratory tests where subjects were asked to perform common types of activities such as lying down, sitting, standing, computer working, cleaning, walking, running, and cycling. The outcome of the classification tree was used to determine individuals' activity behavior by measuring the daily duration of activity types. Total energy expenditure (TEE) was measured with the doubly-labeled water method. Activity energy expenditure (AEE) and the physical activity level (PAL) were determined from TEE and measurements of sleeping energy expenditure in a respiration chamber. The effect of weight loss on physical activity and activity thermogenesis was investigated using a doubly-labeled water validated formula based on activity counts and subject characteristics to determine AEE. Heart rate variability (HRV) analysis was used to evaluate cardiac autonomic balance as an indicator of cardiovascular diseases risk.

It was shown that the activity counts measured with a highly unobtrusive activity monitor, the DirectLife tri-axial accelerometer for movement registration (Tracmor<sub>D</sub>), were significantly correlated with AEE, and PAL. Regression models based on activity counts predicted TEE with a standard error of estimation from 0.9 to 1.3 MJ/d, depending on the independent variables used to represent differences in body size and composition. Activity counts significantly accounted for 17% to 23% of the explained variation in TEE (**Chapter 2**). Whereas activity counts quantify physical activity duration and intensity, the detection of physical activity types using accelerometer's data allows a qualitative assessment of the activity behavior. A decision tree algorithm recognized lying down, sedentary-, walking-, bicycling-, and running activities with accuracy from 91% to 92%. Thus, temporal and spectral features of the accelerometer output proved to significantly describe differences in the pattern of the signal generated by different activity types (**Chapter 3**). Defining the metabolic cost of physical activity by multiplying the measured daily duration of six activity types by their hypothetical average intensity was found to explain, respectively, 9% and 13%

greater variation in TEE and AEE as compared to activity counts only. This indicated that activity recognition can improve the current methodology for estimating energy expenditure from accelerometer data by contributing toward eliminating the limitation of the non-uniqueness in the relationship between activity counts and AEE for different activity types (**Chapter 4**).

The relationship between the activity behavior and PAL was investigated to determine the importance of certain activity types for achieving a high level of daily energy expenditure. Using an accelerometer-based activity recognition algorithm, it appeared that sedentary time, and the engagement in active transportation, such as walking and bicycling, was significantly related to PAL. Therefore, these aspects of individuals' behavior should be targeted when defining intervention strategies to increase physical activity (**Chapter 5**). Furthermore, in a group of obese individuals, it was observed that the habitual activity behavior spontaneously increased after weight loss. However, AEE markedly decreased, as the increase in physical activity was not sufficient to compensate for the decreased cost for physical activity caused by the lower body weight carried during movement. The study revealed that a significant replacement of sedentary time by generic and ambulatory activities was required to restore baseline levels of AEE (**Chapter 6**). However, this would result in additional health benefits and improve the successfulness of weight maintenance. Accelerometer-based physical activity recognition was used to establish the relationship between individuals' activity behavior and markers of cardiovascular health. Frequency domain measures of HRV were significantly associated with the engagement in low-intensity physical activity as recognized by the classification algorithm during postural transition, household activities and generic movement not related to ambulation. This association was interpreted after observing an inverse relationship between low-intensity activity and sedentary time, and the role of sedentary time in increasing insulin resistance and hyperinsulinemia. Thus, the engagement in low-intensity activities could confer cardio protective effects by lowering fasting-plasma insulin concentration and increasing the autonomic control of the heart (**Chapter 7**).

In conclusion, physical activity recognition was successfully achieved using the signal recorded with a single tri-axial accelerometer and a classification algorithm. Although Tracmor<sub>D</sub> showed to be a valid instrument for predicting energy expenditure in free-living conditions, physical activity recognition improved the energy-expenditure estimation accuracy by circumventing issues inherent to the relationship between activity counts and AEE for different activity types. Furthermore, physical activity recognition unraveled which activity types determine the daily activity level, and which behavioral modifications lead to the achievement of higher rates of energy expenditure. In addition, this novel approach to measure physical activity was used to define the dose-response relationship between the engagement in certain physical activity types and HRV indexes, biomarkers related to cardiovascular diseases risks. Thus, advances in accelerometer technology and the introduction of activity recognition models can play a key role in the definition of lifestyle interventions for health promotion, based on response-dependent physical activity recommendations.

# Samenvatting

Strategieën voor ziektepreventie gaan soms gepaard met adviezen om de lichaamsbeweging te stimuleren. Door het gebrek aan objectieve en beproefde instrumenten voor het monitoren van lichaamsbeweging en de bijbehorende fysiologische effecten is het echter moeilijk te bepalen hoeveel lichaamsbeweging noodzakelijk is om specifieke gezondheidsvoordelen te behalen. Dit proefschrift analyseert de potentiële voordelen van bewegingsherkenning en registratie met een versnellingsopnemer om een beter beeld te krijgen van het energiegebruik en van de relatie tussen beweging en gezondheid.

Lichaamsbeweging werd gemeten met behulp van een drie-assige versnellingsopnemer waarmee het ruwe versnellingssignaal kan worden geregistreerd en bewegingen kunnen worden gekwantificeerd als de som van de gecorrigeerde en geïntegreerde versnelling voor elke detectie-as. Diverse typen lichaamsbeweging werden gedetecteerd door gebruik te maken van een beslisboomalgoritme waarmee spectrale en temporele kenmerken van het aan de romp gemeten ruwe versnellingssignaal kunnen worden verwerkt. Het beslisboomalgoritme werd ontwikkeld met een 'oefen dataset', waarvoor proefpersonen werd gevraagd gangbare bewegingstypen te verrichten zoals liggen, zitten, staan, werken op een computer, afwassen, schoonmaken, lopen, hardlopen en fietsen. Aan de hand van het beslisboomalgoritme werd het bewegingspatroon van de proefpersonen berekend in de vorm van de dagelijkse duur van de gespecificeerde bewegingstypen. Gelijktijdig werd het totale energiegebruik (TEE) gemeten met behulp van de tweevoudig gemerkt watermethode. Energiegebruik door beweging (AEE) en het niveau van lichaamsbeweging (PAL) werden afgeleid uit het TEE en metingen van energiegebruik in rust tijdens overnachting in een respiratiekamer. Zo werd een formule gegenereerd om het energiegebruik door beweging te berekenen op basis van de persoonskenmerken lengte, leeftijd, gewicht en geslacht en het gemeten bewegingspatroon. Hiermee werd onderzocht in hoeverre gewichtsverlies van invloed is het energiegebruik door beweging en hoe daarbij de hartfrequentievariatie (HRV) verandert, als indicator voor het risico op hart- en vaatziekten.

Duur en intensiteit van beweging zoals geregistreerd met een makkelijk draagbare monitor, de DirectLife drie-assige versnellingsmeter voor bewegingsregistratie (Tracmor<sub>D</sub>), bleek een goede maat voor AEE en PAL. De op de bewegingsregistratie gebaseerde modellen voorspelden TEE met een nauwkeurigheid van 0,9 tot 1,3 MJ/dag, afhankelijk van de gebruikte maten voor het weergeven van verschillen in lichaams grootte en lichaamsbouw. Bewegingsmeting leverde een significante bijdrage aan de verklaarde variatie in TEE van 17 tot 23% (**Hoofdstuk 2**).

Detectie van het type beweging, naast duur en intensiteit, leverde een verdere verbetering van de voorspelling van TEE. De herkenning van liggen, staan, staan met beweging, lopen, fietsen en hardlopen met het

beslisboomalgoritme had een nauwkeurigheid van 91% à 92%. Frequentie patroon en amplitude van de lichaamsversnelling door beweging, zoals geregistreerd met een versnellingsopnemer, vormden een significant onderscheidend kenmerk voor deze verschillende typen lichaamsbeweging (**Hoofdstuk 3**). De zo gemeten dagelijkse duur van zes bewegingstypen, vermenigvuldigd met hun gemiddelde intensiteit, bleek respectievelijk 9% en 13% méér variatie in TEE en AEE te verklaren dan detectie van enkel duur en intensiteit. Deze verbetering is gebaseerd op correctie voor verschillen in de relatie tussen enerzijds duur en intensiteit en anderzijds AEE voor verschillende typen beweging (**Hoofdstuk 4**).

Meting van type activiteit, naast duur en intensiteit, geeft inzicht in de bijdrage van afzonderlijke activiteiten aan het totale activiteitsniveau. Maatregelen om lichaamsbeweging te bevorderen kunnen zich dan specifiek richten op deze gedragsaspecten. Vermindering van zittende activiteiten ten gunste van vormen van actieve verplaatsing zoals lopen en fietsen dragen het sterkste bij aan een hoger activiteitsniveau (**Hoofdstuk 5**).

Gewichtsverlies resulteert in een vermindering van het activiteitsgebruik door de afname van het te verplaatsen gewicht. Bij een groep personen met obesitas werd vastgesteld dat de gebruikelijke beweging daarentegen spontaan toenam na gewichtsverlies. De bewegingstoename was echter onvoldoende om de energiegebruik verlaging, als gevolg van het geringere lichaamsgewicht dat tijdens beweging wordt meegetorst, volledig te compenseren. De studie liet zien dat nog twee uur rust moest worden ingeruild voor algemene en ambulante activiteiten om het oorspronkelijke AEE te herstellen (**Hoofdstuk 6**). Dit zou de kans op gewichthandhaving na gewichtsverlies bevorderen en ook verdere gezondheidsvoordelen opleveren.

Weinig lichamelijke activiteit met lange rustperiodes is een risicofactor voor hart- en vaatziekten. Hartfrequentievariatie, als indicator voor het risico op hart- en vaatziekten, bleek significant samen te hangen met lichaamsbeweging zoals herkend door het beslisboomalgoritme, tijdens verandering van houding, huishoudelijke activiteiten en algemene beweging (niet gerelateerd aan opstaan). Lichamelijke activiteiten met een lage intensiteit hebben mogelijk al een beschermende werking tegen hart- en vaatziekten door verbetering van de autonome controle van het hart (**Hoofdstuk 7**).

Dit proefschrift beschrijft hoe lichaamsbeweging in verband met gezondheid kan worden gedetecteerd en geregistreerd en geeft voorbeelden van toepassing. Meting van duur en intensiteit van beweging, met één makkelijk draagbaar apparaatje dat rompversnellingen registreert, geeft een betrouwbare schatting van het dagelijks energiegebruik. Type beweging kan betrouwbaar worden gespecificeerd op basis van frequentiepatroon en amplitude van rompversnellingen. Combinatie van activiteitstype, duur en intensiteit geeft een verdere verbetering van de schatting van het dagelijks energiegebruik. Toepassing van deze techniek leidde tot het inzicht dat vermindering van zittende activiteiten ten gunste van vormen van actieve verplaatsing zoals lopen en fietsen het sterkste bijdragen aan een hoger activiteitsniveau. De spontane toename van lichaamsbeweging bij gewichtsverlies is onvoldoende om de

energiegebruik verlaging, als gevolg van het geringere lichaamsgewicht dat tijdens beweging wordt meegetorst, volledig te compenseren. Lichamelijke activiteiten met een lage intensiteit hebben mogelijk al een beschermende werking tegen hart- en vaatziekten door verbetering van de autonome controle van het hart. Technologische doorbraken op het gebied van versnellingsmeters en de invoering van bewegingsdetectiemodellen kunnen zo een belangrijke rol spelen bij het nemen van maatregelen ter bevordering van een gezonde levensstijl in de vorm van aanbevelingen omtrent lichaamsbeweging.



# Sommaro

La prevenzione di malattie croniche necessita spesso interventi sullo stile di vita personale che incoraggino l'attività fisica. Stabilire la quantità di attività fisica necessaria per ottenere specifici benefici di salute é limitato dalla mancanza di validi strumenti di misura e del relativo impatto fisiologico. Questa tesi é focalizzata all'analisi delle potenzialità offerte dal riconoscimento dell'attività fisica attraverso l'utilizzo di un accelerometro, per migliorare la stima della spesa energetica e per rivelare la relazione tra l'attività abitudinaria e la salute personale.

L'attività fisica é stata misurata con un accelerometro triassiale capace di memorizzare il segnale puro di accelerazione e gli *activity counts*, definiti dalla somma dei segnali rettificati ed integrati per ogni asse di misura. Il riconoscimento automatico dei tipi di attività fisica é stato ottenuto utilizzando un algoritmo ad albero, capace di elaborare caratteristiche spettrali e temporali del segnale di accelerazione misurato a livello lombare. Le regole contenute nell'albero di decisione sono state sviluppate utilizzando dati registrati in test di laboratorio, nei quali alcuni individui hanno compiuto diversi tipi di attività comuni, come ad esempio sdraiarsi supini, sedersi, stare in piedi, camminare, correre, pulire, lavorare al computer o andare in bici. L'uscita dell'albero di decisione, rappresentante la durata giornaliera di diversi tipi di attività fisica, é stata utilizzata per determinare le attività abitudinarie dei soggetti misurati durante i test sperimentali. La spesa energetica totale (TEE) é stata misurata utilizzando il metodo di diluizione corporea di acqua marcata con deuterio ed ossigeno-18.

La spesa energetica per attività fisica (AEE) e il livello di attività fisica (PAL) sono stati determinati a partire da misure di TEE e spesa energetica durante il sonno, quest'ultima determinata utilizzando calorimetria indiretta. L'effetto della perdita di peso sull'attività fisica e sulla spesa energetica dovuta ad attività fisica é stata studiata utilizzando una formula per ottenere AEE, basata su *activity counts* e caratteristiche fisiche dell'individuo. Infine, l'analisi della variabilità cardiaca (HRV) é stata effettuata per valutare l'entità del controllo autonomo sul ritmo cardiaco in quanto indicatore di rischio per malattie cardiovascolari.

Questa tesi dimostra che gli *activity counts*, misurati con un dispositivo indossabile per monitorare l'attività fisica (l'accelerometro triassiale DirectLife per la misura del movimento, Tracmor<sub>D</sub>), sono significativamente correlati con AEE e PAL. Modelli di regressione lineare basati su *activity counts* predicono TEE con errori di stima da 0.9 a 1.3 MJ/giorno, in base al tipo di variabili indipendenti rappresentanti differenze di stazza e composizione corporea. Gli *activity counts* contribuiscono dal 17% al 23% nell'influenzare la variazione di TEE (**Capitolo 2**). Mentre gli *activity counts* quantificano durata ed intensità dell'attività fisica, il riconoscimento dei tipi di attività fisica utilizzando dati accelerometrici permettono un'osservazione qualitativa dell'attività abitudinaria. Un algoritmo di decisione ad albero ha dimostrato di riconoscere attività come ad esempio stare sdraiati, seduti, eretti staticamente, camminare, andare in bicicletta e correre,



con un'accuratezza compresa tra 91% e 92%. Quindi, caratteristiche temporali e spettrali di dati accelerometrici descrivono significativamente le differenze nel pattern del segnale generato dai diversi tipi di attività fisica (**Capitolo 3**).

L'accuratezza dei modelli per la stima della spesa energetica è stata migliorata, definendo il costo metabolico dell'attività fisica moltiplicato per la durata giornaliera di sei diversi tipi di attività per la loro ipotetica intensità. Questo nuovo parametro ha contribuito ad aumentare dal 9% al 13% l'accuratezza dei modelli per la stima di TEE e AEE in confronto a quelli basati su *activity counts*. Ciò indica che il riconoscimento dell'attività fisica migliora il metodo tradizionale per stimare la spesa energetica grazie all'utilizzo dei dati accelerometrici. La ragione risiede nell'abilità di modelli basati sul riconoscimento dell'attività fisica di eliminare il problema rappresentato dalla non unicità della relazione tra *activity counts* ed AEE per i diversi tipi di attività (**Capitolo 4**).

L'influenza dell'attività abitudinaria sulla PAL è stata studiata per definire quali tipi di attività assumono particolare importanza nel raggiungere un'alto livello di spesa energetica giornaliera. Con l'utilizzo di un algoritmo di classificazione dell'attività fisica, è emerso che la durata di occupazioni sedentarie e di tipi di attività come camminare e andare in bicicletta, sono significativamente correlate al PAL. Ciò suggerisce che questi aspetti dell'attività abitudinaria dovrebbero essere presi in considerazione nel definire strategie per aumentare l'attività fisica e la spesa energetica (**Capitolo 5**). Inoltre, in un gruppo di soggetti obesi, è stato mostrato che l'entità dell'attività abitudinaria aumentava spontaneamente dopo la perdita di peso. Al contrario la AEE diminuiva, a causa del fatto che l'aumento dell'attività fisica non era mediamente sufficiente a compensare il ridotto costo dell'attività fisica determinato dal minor peso corporeo trasportato durante il movimento. Lo studio ha rivelato che nella popolazione esaminata per far ritornare AEE a valori uguali a quelli iniziali, era necessaria una diminuzione delle occupazioni sedentarie sostituendole con attività sia generiche che ambulatorie (**Capitolo 6**). Ciò comporta benefici per la salute ma anche un più facile mantenimento di peso corporeo dopo una dieta.

Il metodo computazionale usato per il riconoscimento dell'attività fisica è stato impiegato per stabilire la relazione tra l'attività abitudinaria ed indici della salute cardiovascolare. Misure nel dominio della frequenza della variabilità cardiaca, erano significativamente correlate alla durata di attività a bassa intensità, come identificato dall'algoritmo di classificazione durante transizioni posturali, lavori domestici e movimenti generici effettuati stando in piedi ma diversi dal camminare o correre. Questo rapporto è stato interpretato osservando per prima cosa la relazione inversa tra attività a bassa intensità e occupazioni sedentarie e successivamente l'influenza della durata di occupazioni sedentarie nell'aumentare la concentrazione sanguigna di insulina. Ciò ha portato a concludere che effettuare attività a bassa intensità può offrire protezione contro malattie cardiovascolari, per via della diminuzione della concentrazione di insulina e del relativo aumento del controllo cardiaco autonomo (**Capitolo 7**).

In conclusione, il riconoscimento automatico dell'attività fisica è stato ottenuto con successo, utilizzando il segnale misurato con un accelerometro triassiale ed un algoritmo di classificazione ad albero. Sebbene Tracmor<sub>D</sub> si è dimostrato uno strumento valido per predire la spesa energetica giornaliera, il riconoscimento dei tipi di attività fisica ne ha migliorato la stima, evitando il problema inerente alla relazione tra *activity counts* ed AEE per diversi tipi di attività. Inoltre, questo nuovo approccio ha portato alla definizione di quali modificazioni nell'attività abitudinaria comportano un incremento della spesa energetica. Per finire, il riconoscimento dell'attività fisica è stato usato per definire la relazione esistente tra i tipi di azioni compiute giornalmente e indici della variabilità cardiaca, rilevanti come indicatori del rischio per malattie cardiovascolari. Futuri progressi tecnologici per sensori di accelerazione e l'uso di algoritmi di riconoscimento dell'attività fisica, potranno giocare un ruolo chiave nella definizione di interventi per la promozione della salute, basati su prescrizione dell'attività fisica incentrati sulla risposta fisiologica desiderata.

