

# 使用者の意図を推定するインテリジェント・トレッドミル の開発とこれを用いた運動効果の検証

神戸大学大学院 長野明紀

## Research and Development of an Intelligent Treadmill that Adapts to the Intention of the User

by

Akinori Nagano

*Department of Computational Science,  
Graduate School of System Informatics  
Kobe University*

### ABSTRACT

As aged population increases in our society, the importance of maintaining and improving the quality of life is attracting more and more attention. An increasing number of people are regularly performing walking and running as easy-to-start exercises. When walking or running indoors, treadmills are frequently utilized. Typically, users set the belt speed of treadmills using control buttons, and walk/run on the treadmill at the set speed. However, this is not what people usually do when walking/running over the ground. Normally, the walking/running speed is not a constant value but fluctuates around the intended speed. This is because the speed is finitely adjusted according to the intent of acceleration/deceleration. To address this issue, we developed an intelligent treadmill that estimates the intention of the user. We used the 6-axes force sensors embedded in the treadmill, and analyzed the ground reaction force data to estimate the intention of acceleration/deceleration. We also made it possible to distinguish walking/running locomotion patterns. This enables the users to start from standing still, gradually accelerate the walking speed, transition to running,

and speed up/down as she or he likes, quite seamlessly. This is a result to greatly improve the utility of treadmill systems.

## 要 旨

高齢化の進行する現代において、クオリティ・オブ・ライフを維持・改善することの重要性が日々高まっている。定期的に運動を行うことの重要性が認識され、手軽に実施できる運動としてウォーキングやランニングを行う人口が増えている。室内での歩行・走行動作のトレーニングにおいてはトレッドミルが良く用いられる。一般的にトレッドミルを用いる際には、目標とするベルト駆動速度をボタン等を用いて手動で設定し、その後に使用者がその一定速度に合わせて歩行・走行動作を行う。これは通常の環境で歩行・走行を行う際とは異なるものである。通常の環境での歩行・走行動作においてはその速度は必ずしも一定ではなく、ばらつきが存在する。これは歩行者・走者の加速・減速意図に応じて時々刻々速度が調節されているためである。本研究ではこの問題に取り組み、使用者の意図を推定して歩行・走行速度を調節するインテリジェント・トレッドミルを開発した。トレッドミルに内蔵される6軸の力センサを用いて、床反力の波形を解析し加速・減速の意図を推定するアルゴリズムを構築した。また歩行・走行動作を判別することも可能にした。これにより静止状態から開始して、徐々に歩行速度を増加させ、走行動作に遷移したのち更に速度を変化させるという一連の動作をシームレスに行う事が可能になった。これは従来のトレッドミルの使い勝手を大幅に向上させるものである。

## 緒 言

今日、急速に進む社会の高齢化に伴い、クオデサントスポーツ科学 Vol. 34

リティ・オブ・ライフの維持と改善に注目が集まっている。運動機能の低下はクオリティ・オブ・ライフの低下に直結するため、運動機能を維持・回復させることに注目が集まっている。先行研究の中で長期的な運動訓練を行うことで平衡機能の減退を抑制できる、あるいは減退した平衡機能を回復できることが報告されている<sup>1)</sup>。我々も同様の着眼点から、運動機能の訓練・評価機器の開発を行うことを大きな目標としている。

その一環として、本研究ではヒトの歩行・走行動作の意図を推定するインテリジェント・トレッドミルの開発を行った。室内での歩行・走行動作のトレーニングにおいてはトレッドミルが頻繁に用いられる。一般的なトレッドミルでは目標とするベルト駆動速度をボタン等を用いて指定して、使用者がその一定速度に合わせる形で歩行・走行動作を行う。これはインターフェースとしては広く用いられているものの、使用者が隨時ベルト速度を手動で調節する必要がある。通常の歩行・走行動作においては好きなときに歩行・走行を始め、主として脚部の蹴り出しを調節することで意のままに加速・減速を行っている。トレッドミル上でもこの様な速度調節が可能になれば、より自然に近い歩行・走行動作が可能になると考えられる。

同様に通常の環境での歩行・走行動作においてはその速度は必ずしも一定ではなく、ばらつきがあるものと考えられる<sup>2)</sup>。歩行者・走者の加速・減速意図に応じて時々刻々速度が調節されていると考えられるためである。それに対してトレッドミルではベルト速度が基本的に一定に調節されるため（加速・減速の際には別の一定値に遷移する），この点でも自然な歩行・走行動作とは

異なるものになると考えられる。

本研究ではこれらの問題を解決するため、使用者の意図する歩行・走行速度を実現するインテリジェント・トレッドミルを開発した。このトレッドミルにおいては、使用者は通常地面の上を歩行・走行する際と同様に動作を開始し、加速・減速を行うことが可能である。手動によるボタン操作などは一切必要無い。また、歩行動作から走行動作、或いは走行動作から歩行動作への切り替えも自在に行うことが出来る。このシステムによって、より自然な状態に近い歩行・走行動作をトレッドミル上で行うことが可能になった。これはトレッドミルの使い勝手を大幅に改善する成果であるといえる。

### 1.1 方 法

#### 1.1.1 実験機器

システムのプラットフォームとしてはベルテック社製のスプリット・ベルト型トレッドミル TM-07-B を用いた(図1)。このトレッドミルには力センサが内蔵されており、左右のユニットはそれぞれ6成分の信号を出力する。左右のユニットは構造的に分離しているので、左右脚それぞ

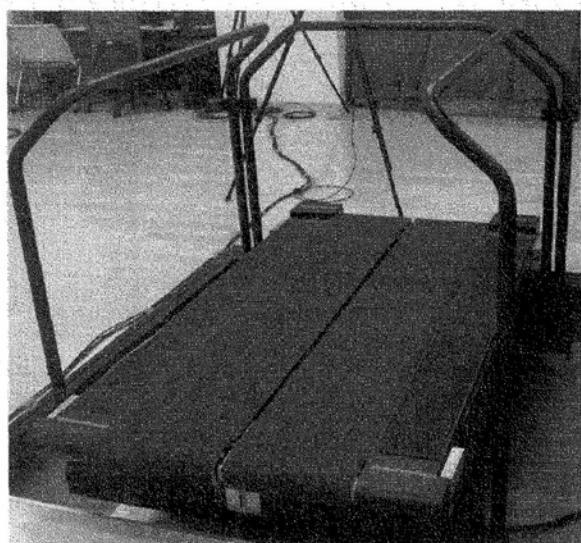


図1 本研究で用いたトレッドミル。左右分離したユニットからなり、独立なセンシングと制御が可能である。それぞれのユニットから6成分(力3成分、モーメント3成分)の出力を得ることが出来る。

れ独立な計測が可能であるうえ、独立に制御できる。ユニットから出力される信号をキャリブレーションして、これらの信号をx軸方向、y軸方向、z軸方の力及びx軸、y軸、z軸まわりのモーメントとして取り扱うことができる。このトレッドミルはTCP/IP通信により制御できる。本研究においてはデータ収録ソフトLabVIEW(National Instruments Corporation, Austin, TX, USA)を用いて開発したプログラムにより全ての演算処理と通信を行い、トレッドミルを制御した(図2)。

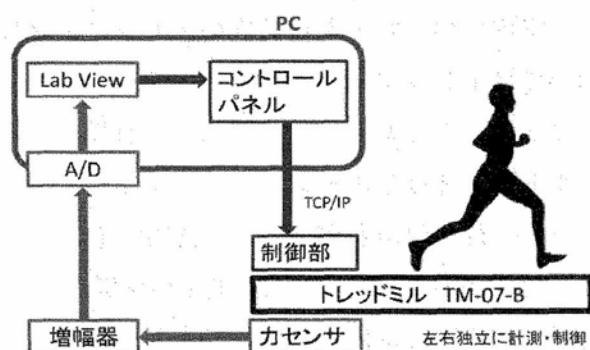


図2 本研究で用いた実験システム。トレッドミルには力センサが内蔵されており、リアルタイムにデータを取得することが出来る。またトレッドミルのベルト速度はTCP/IP通信により制御することができる。データの処理と通信はLabViewを用いて行った。

#### 1.2 一定速度で歩行・走行した際の床反力の計測と分析

まず、様々な一定速度で歩行・走行した際の床反力データを計測し、使用者の意図を推定する手がかりとなる特徴を抽出した。被験者は成人男性5名とした。被験者はトレッドミル上で、一定速度で1分間歩行・走行を行った。この計測は速度を変えて歩行・走行についてそれぞれ7回ずつ行った。データとしては左右のx、y、z軸方向の力およびx、y、z軸まわりのモーメントを計測した。サンプリング周波数は1000Hzとした。床反力のデータから一歩ごとの推進成分の力積(座標系ではy軸方向に相当:図3)、遊

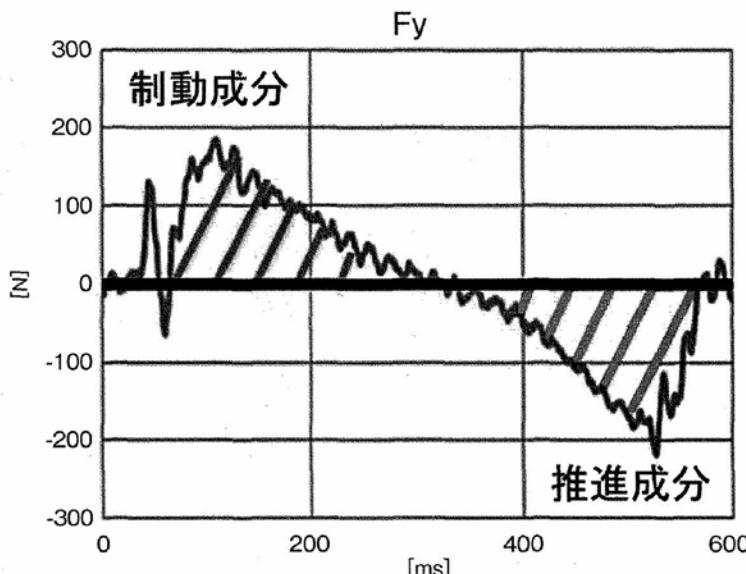


図3 床反力の制動成分と推進成分。トレッドミルの座標系では前後方向がy軸に対応し、制動方向が正、推進方向が負となっている。本研究では推進成分の力積を意図推定に用いた。

脚期間の長さ、立脚期間の長さをパラメーターとして抽出した。これらの変数を右辺、トレッドミルのベルト速度を左辺に置いた重回帰式を導いた。回帰式は歩行動作・走行動作それぞれについて別個に求めた。これによってベルト速度と床反力データとの間を関係づける式を導いたことになる。

### 1.3 歩行・走行動作の切り替え判別

歩行・走行動作の切り替えについては両脚支持期の有無によって判別する事とした。歩行時には両脚支持期・片足支持期・遊脚期があり、走行時には片足支持期・遊脚期がある（両脚支持期がない）<sup>3)</sup>。そのため両脚支持期があれば歩行、両脚支持期が無ければ走行と判定することが出来る。本研究では左右独立のスプリット・ベルト型トレッドミルを使用しているのでこの判定が可能である。

### 1.4 インテリジェントなアルゴリズムのトレッドミルへの実装と検証実験

上記で開発したアルゴリズムをトレッドミルへ実装した。アルゴリズムとしては、時々刻々得られる床反力データをリアルタイムに解析し、

(1) まず歩行動作・走行動作のどちらを実施しているのかを判別した。(2) 次に床反力の推進成分の力積・立脚期間の長さ・遊脚期間の長さから、それに対応するベルト速度を計算した。これには歩行・走行それぞれに対応した重回帰式を用いた。これにより、使用者の意図する歩行・走行速度を推定するインテリジェントなトレッドミルを構築することが出来た。

検証実験においては被験者にトレッドミルの上に乗って頂き、その眼前に目標速度と実際の速度を表示した。被験者には目標速度を実現するよう指示した。目標速度は徐々にステップ状に大きくなるよう設定した。その範囲は遅い歩行に対応する速度から通常のジョギング程度の速度であり、最終的には全ての被験者が走行動作へ切り替えを行った。どの速度で歩行から走行へ切り替えるかの指示は与えず、被験者それぞれの自由な選択に任せることとした。

## 2. 結 果

### 2.1 床反力計測データ

床反力データを解析した結果、歩行・走行速度が増加するにつれて推進方向の力積が増加する傾向がみられた（図4）。立脚時間については、

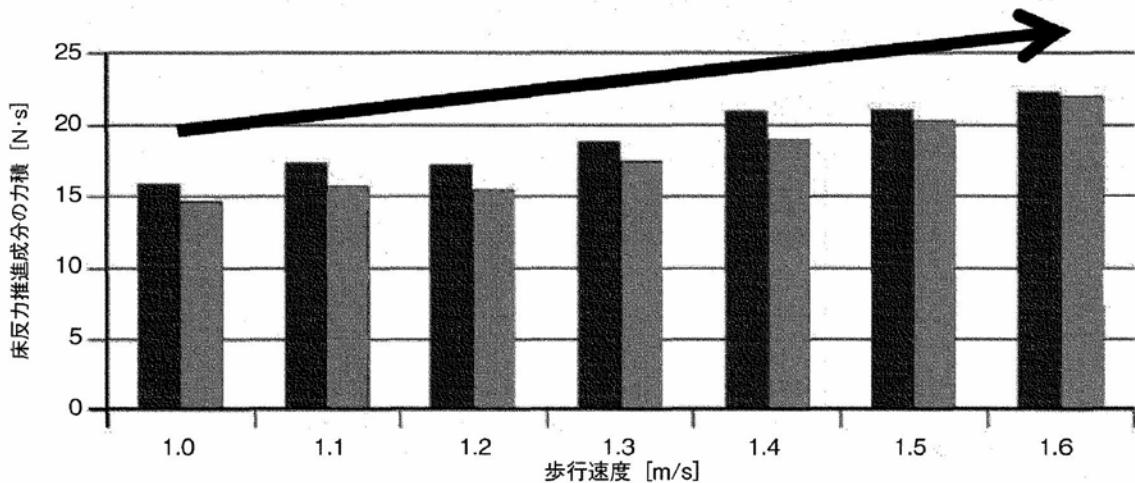


図4 歩行速度と床反力推進成分の力積の関係。左側のバーが左脚に、右側のバーが右脚に対応する。歩行速度の増加に伴い力積が増加する傾向がみられた。走行動作においても同様の傾向が見られた。

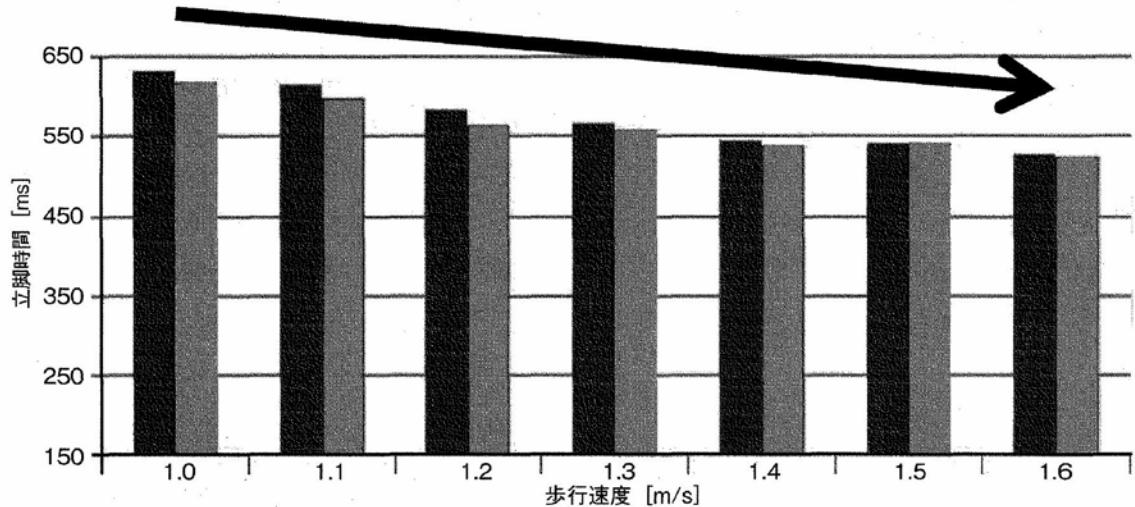


図5 歩行速度と立脚時間の関係。左側のバーが左脚に、右側のバーが右脚に対応する。歩行速度の増加に伴い立脚時間が減少する傾向がみられた。走行動作においても同様の傾向が見られた。

歩行・走行速度の増加につれて低下する傾向が見られた(図5)。遊脚時間については、歩行速度の増加につれて低下し、歩行動度の増加につれて大きくなる傾向が見られた(図6)。全ての被験者において同様の傾向が見られた。ここで得られた結果は先行研究の中で報告されている傾向と合致する<sup>4,5)</sup>。

## 2.2 歩行・走行速度と床反力データの回帰分析

2.1の結果を受けて、歩行・走行速度を左辺、床反力推進成分の力積・立脚時間・遊脚時間を右

辺とする重回帰式を作成した。歩行用の重回帰式、走行用の重回帰式それぞれを作成した。なお、力積についてはそれぞれの被験者の体質量で除して規格化した。全ての被験者に共通して使える回帰式を作成した。

### 2.3 検証実験

検証実験においては、全ての被験者がインテリジェント・トレッドミルを用いて自在に歩行・走行速度を調節できた(図7,8)。また、歩行・走行動作の切り替えも問題無く実施出来た。ベルト速度のばらつきを詳細に評価したところ、走

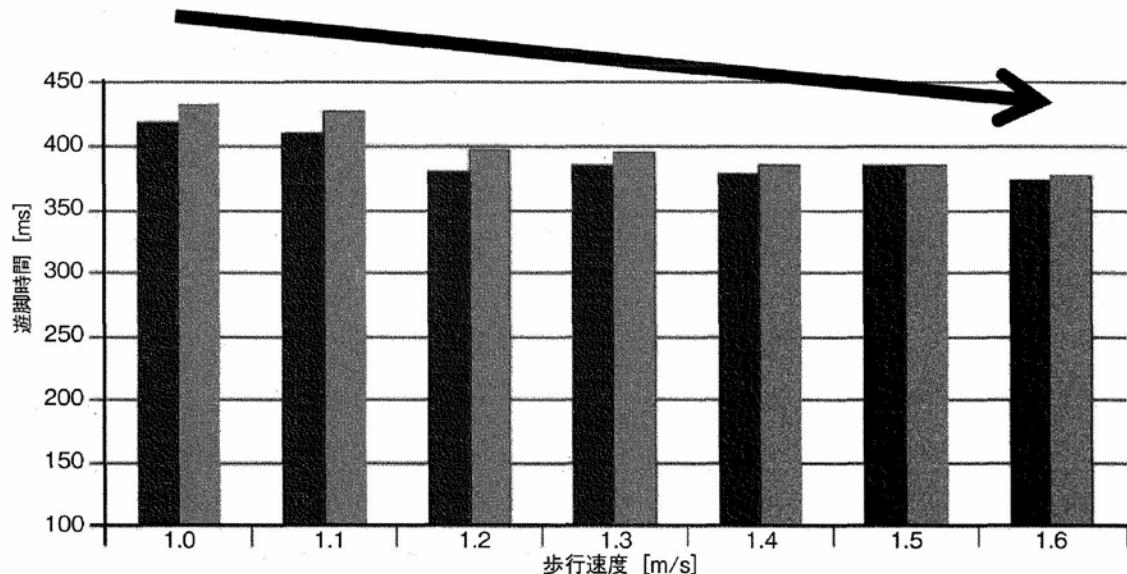


図6 歩行速度と遊脚時間の関係。左側のバーが左脚に、右側のバーが右脚に対応する。歩行速度の増加に伴い遊脚時間が減少する傾向がみられた。走行動作においても同様の傾向が見られた。

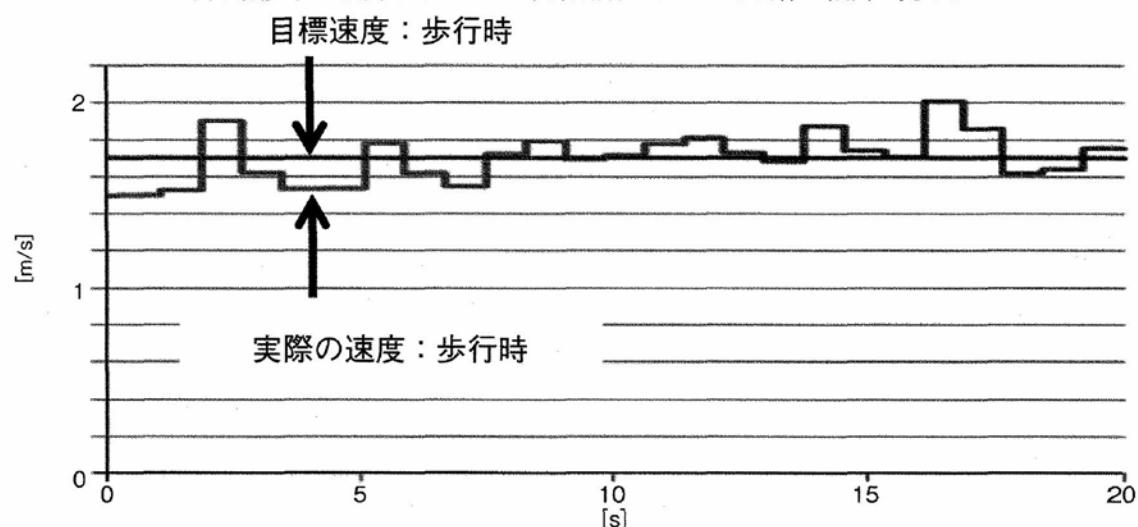


図7 歩行速度の目標値と実際の速度。目標値の近傍に速度を調整出来た。

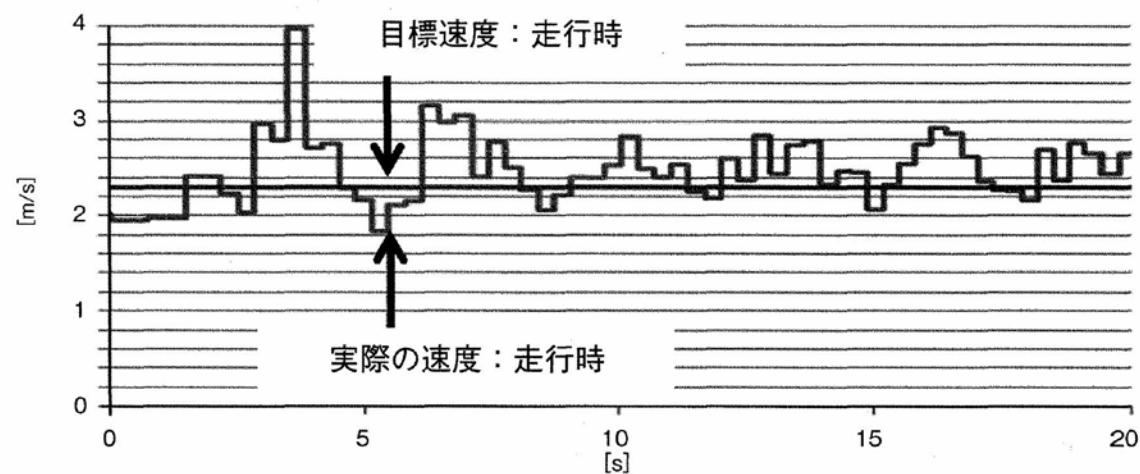


図8 走行速度の目標値と実際の速度。目標値の近傍に速度を調整出来たが、歩行の際に比べてばらつきが大きかった。

行動作ではばらつきが歩行動作よりも大きくなることが解った。

### 3. 考 察

本研究では床反力データを用いて使用者の意図する歩行・走行速度を推定する事を試みた。運動方程式からも床反力が使用者の重心運動を直接的に支配することが解る<sup>6)</sup>。そのため床反力に着目することで妥当な推定が可能になると考えた。本研究の結果インテリジェント・トレッドミルの開発に成功したことはこの着眼点が適切であったことを示すものである。

本研究では重回帰演算という統計学的処理により推定アルゴリズムを導いている。力学的モデルを用いて歩行・走行動作をより詳細に分析した上で身体各部の速度・加速度を導く事も可能であるが<sup>7)</sup>、それにはキネマティクス的データ等多種・多量のデータが必要であり、光学式モーションキャプチャー等の設備が必要である。本研究ではトレッドミルから得られる力データのみを用いて推定を行う事を前提としたため統計的なアプローチを採用した。結果として上手く動作するシステムを構築できたので、本研究で採用した手法が適切であったと考えられる。

走行動作(図8)においては歩行動作(図7)よりも大きなばらつきが見られた。この一因としては走行において被験者の動作自体のばらつきが大きかった事が考えられる(走行動作のばらつきについては<sup>8)</sup>等に詳細に論じられている)。本研究で開発したアルゴリズムでは一歩ごとに意図する速度を推定し、それを即座にベルト速度に反映させている。そのため被験者の動作のばらつきが直接的にベルト速度のばらつきとして反映される。また、走行動作中の床反力にはより多くのノイズ様の信号が含まれるため、力積・立脚時間・遊脚時間の計算にばらつきが生じるとも考えられる。将来的には適切なフィルタリ

ングによって動作を改善できると考える。最適なフィルタリング手法については今後検討していく予定である。

本研究で開発したシステムを用いることにより、自然な歩行・走行に近い動作をトレッドミル上で実現することが出来る。これは運動機能訓練に応用できるのみならず、バーチャルリアリティの技術と融合させることで認知機能等をも対象としたより広範な評価と訓練に適用できると考えられる<sup>9)</sup>。今後この方向でも本研究を発展させて行く予定である。

### 4. 結 論

本研究では使用者の意図を推定するインテリジェント・トレッドミルを開発するため、歩行・走行時の床反力データから有用な情報を抽出するアプローチを取った。特に床反力推進成分の力積、遊脚時間、立脚時間に着目し、これらから使用者の意図する歩行・走行速度を推定する重回帰式を作成した。このアルゴリズムをトレッドミルに組み込んで検証実験を行ったところ、全ての被験者が自在に歩行・走行速度を調節でき、且つ歩行動作と走行動作の切り替えも自然に行えた。よって本研究で意図したインテリジェント・トレッドミルの開発は成功したと言うことが出来る。一方でベルト速度のばらつきは走行動作時において歩行動作時よりも大きく、この点は改善の余地があると考えられる。この点については今後の研究で取り組んでいきたいと考える。

### 謝 辞

本研究を助成してくださった公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に感謝の意を表したい。本研究は神戸大学大学院システム情報学研究科・計算科学専攻・計算ロボティクス研究室で実施した。研究に大きな貢献をし

た加藤翔一氏、巖和隆氏、董海巍氏に感謝する。また、研究遂行に際しては同研究室の羅志偉教授に多大なご助力を頂いた。被験者や験者として協力くださった学生諸君にも感謝する。

## 文 献

- 1) 神崎素樹, 政二慶, 宮谷昌枝, 村岡哲郎, 白澤葉月, 久野譜也, 金久博昭, 福永哲夫, 長期運動トレーニングによる高齢者の平衡機能減退の抑制. 体力科学, 52, p157-166(2003)
- 2) Masani, K., Kouzaki, M., Fukunaga, T., Variability of ground reaction forces during treadmill walking. *Journal of Applied Physiology*, 92 (5), 1885-1890 (2002)
- 3) Enoka, Neuromechanics of human movement. Third edition. Human Kinetics, Illinois, USA (2002)
- 4) Martin, P.E., Marsh, A.P., Step length and frequency effects on ground reaction forces during walking. *Journal of Biomechanics*, 25, 1237-1239(1992)
- 5) Martin, P.E., Morgan, D.W., Biomechanical considerations for economical walking and running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(4), 467-474(1992)
- 6) Winter, D.A., Biomechanics and motor control of human movement. Fourth edition. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, USA (2009)
- 7) Yamaguchi, G.T., Moran, D.W., Si, J., A computationally efficient method for solving the redundant problem in biomechanics. *Journal of Biomechanics*, 28 (8), 999-1005(1995)
- 8) Ferber, R., McClay, D.I., Williams, D.S.3rd, Laughton, C., A comparison of within- and between-day reliability of discrete 3D lower extremity variables in runners. *Journal of Orthopedic Research*, 20 (6), 1139-1145(2002)
- 9) Dong, H., Luo, Z., Nagano, A., Mavridis, N., An adaptive treadmill-style locomotion interface and its application in 3-D interactive virtual market system. *Intelligent Service Robotics*, 5, 159-167(2012)