

歩容からの身体特徴と動作特徴の分離による 手荷物の物理的・主観的重さ推定

水野 雅也^{1,a)} 川西 康友^{2,1} 出口 大輔¹ 村瀬 洋¹

概要

本研究では、手荷物所持者の歩行の様子から手荷物の実際の重さ（物理的重さ）と、その人がその手荷物をどのくらい重く感じているか（主観的重さ）の推定を目的とする。所持者の姿勢は物理的重さだけでなく体格などの違いによっても大きく変化するうえ、同じ物理的重さでも人によって主観的重さは異なる。この問題に対して、歩行の様子から人に固有の特徴を表す身体特徴と、身体特徴を排除した動作特徴を分離し、各重さ推定で特徴を適切に重み付けする手法を提案する。実験により、各重さの推定ができることを確認した。

1. はじめに

近年、見回りロボットが様々な場所で利用されるようになってきた [1]。人と共存するロボットには、観測した周囲環境の情報をもとに自主的に人を支援する能力が求められる。本発表ではこのような支援の一つとして、手荷物を重そうに持っている人を自主的に支援することに着目する。

手荷物を重そうに持っている人を自主的に支援するためには、支援を行なうかどうかの判断能力が不可欠である。手荷物の重さがロボットの持てる最大重量を超えていないかどうかや、支援を必要としていそうかを見極め、適切なタイミングで支援する必要がある。

これらの見極めのためには、実際の重さだけでなく、人が手荷物をどの程度重く感じているかを推定する必要がある。本発表では、実際の重さのことを物理的重さ、どの程度重く感じているかを主観的重さと定義する。物理的重さによりロボットが持てる重さであるかを判断し、主観的重さによりその人にロボットによる支援が必要かを判断する。

手荷物の重さを推定するために、身体動揺を用いる研究 [4] がある。身体動揺とは、直立して静止していても体に生じるわずかな揺れである。この研究では、手荷物の重さが重いほど大きくなるという身体動揺の特徴に着目して、

手荷物の重さを推定する。しかし、身体動揺を計測するためには静止している人を頭上真上から撮影する必要があり、今回想定しているロボットの視点からの観測は難しい。

手荷物の物理的重さによる負荷が人の歩行に与える影響を調査した論文 [2] では、手荷物の物理的重さが大きくなると、骨盤傾斜が大きくなり、これが歩行に影響を与えることが示されている。また、この時の歩行への影響は、手荷物を持つ人の体格・体重等の身体特徴も関係している。手荷物を持つ人にとっての主観的重さが同じであった場合、身体特徴に依存せず歩行時の姿勢は類似すると仮定する。以上より本研究では、歩き方に加え、身体特徴に着目して手荷物の物理的重さと主観的重さを推定する。

歩き方は骨格の時間変化に表れる [2]。そのため、手荷物の物理的重さと主観的重さの推定では歩き方の表現として歩行時の骨格の時間変化を用いた行動認識手法を応用できると考えられる。しかしこのような行動認識手法は、人の違いによる影響を最小化するように学習されるため、身体特徴の違いを考慮する必要がある手荷物の物理的重さや主観的重さは推定には適さないと考えられる。

主観的重さにおいては身体特徴は排除すべきであり、物理的重さでは身体特徴を考慮すべきである。そのため、本研究では、歩行時の骨格の時間変化で表現された歩き方の特徴を、体格・体重等を表す身体特徴と、それを排除した動作特徴に分離して手荷物の重さの推定に活用する手法を提案する。歩き方の特徴を、“人に固有な特徴を表す身体特徴”と“身体特徴を排除した動作特徴”に分離したうえで、これらの特徴を重さの種類によって選択的に利用して推定する枠組みを提案する。

以下、2 節で手荷物の物理的重さと主観的重さの推定手法について述べる。次に、3 節で実験とその評価について述べる。最後に、4 節でまとめと今後の課題について述べる。

2. 手荷物の物理的重さと主観的重さの推定

2.1 提案手法の概要

本研究では、歩行時の骨格変化の表現方法として、推定に関係がない背景の影響を受けない 3D 人物骨格系列を利用する。歩行は 2 歩の繰り返しであることに着目し、2 歩

¹ 名古屋大学

² 理化学研究所ガーディアンロボットプロジェクト

^{a)} mizunom@vislab.is.i.nagoya-u.ac.jp

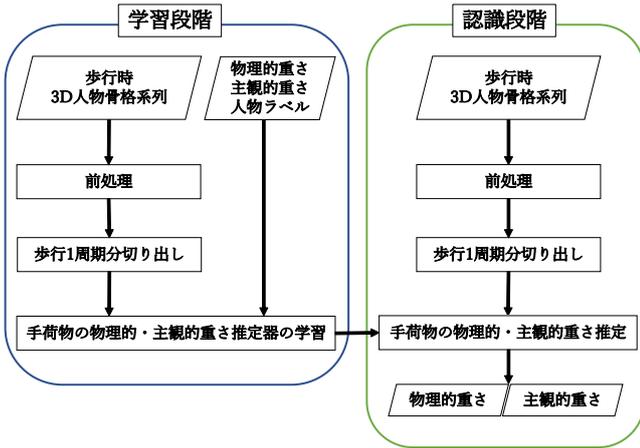


図 1: 提案手法の処理手順

分を歩行 1 周期とする。そして、歩行 1 周期分の 3D 人物骨格系列により表現された歩行時の姿勢から、手荷物の物理的の重さと主観的の重さを回帰で推定する。図 1 に提案手法の処理手順を示す。提案手法では、前処理を施した後に得られる歩行 1 周期分の 3D 人物骨格系列 X を手荷物の物理的・主観的の重さ推定器に入力し、手荷物の物理的の重さと主観的の重さの推定結果を得る。

以下ではまず、手荷物の物理的の重さと主観的の重さの推定手法の全体構成について述べる。次に、歩行時の 3D 人物骨格系列に対して行う前処理について述べる。最後に、本手法で利用する 2 つの特徴抽出モジュールについて述べる。

2.2 手荷物の物理的の重さと主観的の重さの推定手法の全体構成

提案手法では、物理的の重さ推定は身体特徴を利用し、主観的の重さは身体特徴を排除して推定する。図 2 に物理的の重さと主観的の重さの推定器の構造を示す。まず、歩行時の 3D 人物骨格系列 X から、身体特徴抽出モジュール f_p により身体特徴 $\mathbf{x}_p = f_p(X, \theta_p)$ を、動作特徴抽出モジュール f_q により動作特徴 $\mathbf{x}_q = f_q(X, \theta_q)$ を抽出する。そして、これらの特徴を用いて各重さを推定する。物理的の重さ推定では、 $[\mathbf{x}_p, \mathbf{x}_q]$ を物理的の重さ推定器 g_p に入力し、物理的の重さ推定結果 $\hat{y}_p = g_p([\mathbf{x}_p, \mathbf{x}_q]; \theta_r)$ を得る。主観的の重さの推定では、 \mathbf{x}_q を主観的の重さ推定器 g_s に入力し、主観的の重さ推定結果 $\hat{y}_s = g_s(\mathbf{x}_q; \theta_s)$ を得る。 $\theta_p, \theta_q, \theta_r, \theta_s$ は学習により決定する。

学習では、推定した各重さと正解値の差に基づく誤差 L を求める。

$$L = L_p + L_s \quad (1)$$

L_p は物理的の重さの平均二乗誤差であり L_s は主観的の重さの平均二乗誤差である。さらに、 L に後述する各モジュールで計算する誤差 L_t, L_o を追加した L_a を最小化するように誤差逆伝播法により推定器の重みを更新する。

$$L_a = L + L_t + L_o \quad (2)$$

2.3 前処理

提案手法では、歩行時の 3D 人物骨格系列に対して前処理を行う。まず、人の位置や向きによる影響を排除するように、歩行時の 3D 人物骨格系列の正規化を行なう。腰の関節点座標が原点になるように平行移動することで位置の正規化を行ない、右腰と左腰の向きが Z 軸に垂直になるように回転処理することで向きの正規化を行なう。

次に、歩行時の人物骨格系列から歩行 1 周期分の 3D 人物骨格系列を切り出す。切り出しは、左足関節点と右足関節点の奥行き方向の座標の差が極大となる点を基準として行なう。

最後に、歩行 1 周期分の 3D 人物骨格系列はそれぞれ系列長が異なるため、フレーム間補間を行いながら系列から等間隔に M フレーム抜き出して固定長とし、 X を得る。

2.4 特徴抽出モジュール

2.4.1 身体特徴抽出モジュール

身体特徴は人ごとに異なると考え、身体特徴抽出モジュールでは、身体特徴を人ごとに分離できるように学習する。ここでは、歩行 1 周期分の 3D 人物骨格系列 X を MS-G3D [3] に基づく特徴抽出器 f_p に入力することで身体特徴 $\mathbf{x}_p = f_p(X; \theta_p)$ を得る。学習には、身体特徴 \mathbf{x}_p を用いて人を区別できるように、人物ラベルによる式 (3) の Triplet Loss を導入する。

$$L_t = [d_p - d_n + \alpha]_+ \quad (3)$$

$$[z]_+ = \max(0, z)$$

d_p は、ある 3D 人物骨格系列 X^{A_1} から抽出した身体特徴 $\mathbf{x}_p^{A_1}$ と、同一人物ラベルの別の 3D 人物骨格系列 X^{A_2} から抽出した身体特徴 $\mathbf{x}_p^{A_2}$ の距離 $|\mathbf{x}_p^{A_1} - \mathbf{x}_p^{A_2}|$ で、 d_n は、別の人の 3D 人物骨格系列 X^B から抽出された身体特徴 \mathbf{x}_p^B との距離 $|\mathbf{x}_p^{A_1} - \mathbf{x}_p^B|$ である。また、 α はマージンを定める定数である。本実験で使用する身体特徴抽出モジュールの構造を図 3 に示す。中間層の活性化関数には Leaky ReLU を用いる。

2.4.2 動作特徴抽出モジュール

動作特徴抽出モジュールでは、動作特徴が人を区別できない特徴になるよう学習する。まず、歩行 1 周期分の 3D 人物骨格系列 X を MS-G3D に基づく特徴抽出器 f_q に入力することで動作特徴 $\mathbf{x}_q = f_q(X; \theta_q)$ を得る。この \mathbf{x}_q を、Gradient Reversal Layer [5] を通して人物ラベル推定器 $y_l = h(\mathbf{x}_q)$ に入力する。これにより、動作特徴が人を区別できないような特徴になるように学習できる。動作特徴抽出モジュールを図 4 に示す。中間層の活性化関数は Leaky

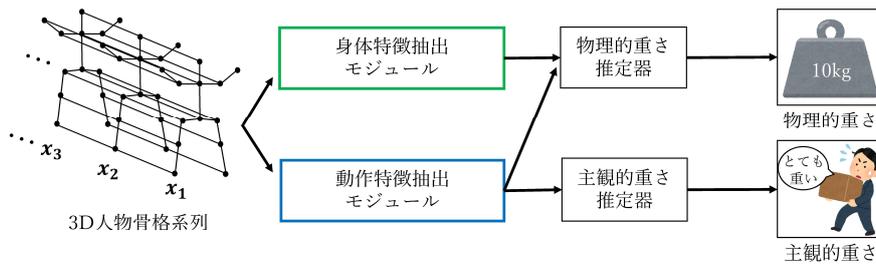


図 2: 物理的長さ推定器と主観的長さ推定器の構造

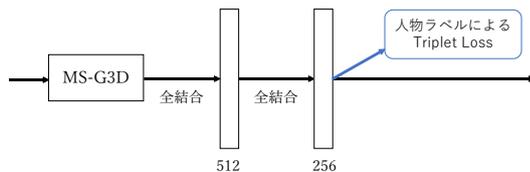


図 3: 身体特徴抽出モジュールの構造

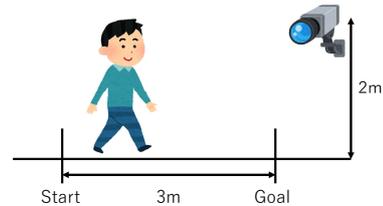


図 5: 撮影環境を横から見た図

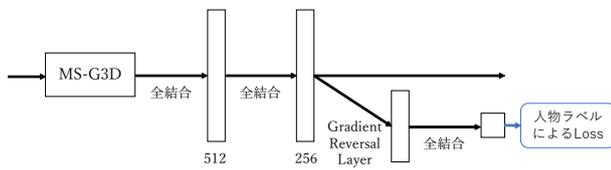


図 4: 動作特徴抽出モジュールの構造



図 6: 撮影画像と 3D 人物骨格の例

ReLU を用いる。このとき、人物ラベル推定器は交差エントロピー誤差 L_c を用いて学習する。

3. 実験

3.1 データセット

歩行時の人の様子を撮影し、その人の手荷物の物理的長さと主観的長さを真値として付与した公開データセットはないため、本研究では実験用データセットの撮影を行った。本節ではデータセットを構築した際の撮影条件及びその内容について述べる。

本研究では、1 人の歩行者が 1 つの手荷物を持って歩いている状況を想定する。実験参加者に手荷物を所持して歩かせ、その様子を Microsoft 社製の Azure Kinect センサで撮影することで 3D 人物骨格系列 (25 関節, 3 次元) を取得した。実験環境を横から見た図を図 5 に示す。また、撮影した画像と 3D 人物骨格の例を図 6 に示す。3D 人物骨格系列の系列長 $M = 25$ とした。

データセット撮影のために、20–60 代の被験者 12 名 (男性 7 名, 女性 5 名) を用意した。また、手荷物の種類は、手提げ鞆、肩さげ鞆、リュックサック、段ボール、買い物かごとし、手荷物の内容量は、0kg, 5kg, 7.5kg, 10kg, 12.5kg, 15kg とした。内容量は重りで調整した。主観的長さの正解値は、アンケート調査により収集した。アンケートは、0 点を何も持っていない状態、100 点を 20kg の手提げ鞆を所持したときに感じる長さ、70 点を助けが欲しいと感じ

る長さとし、各手荷物を持った歩行の後に点数をつけさせた。このとき、物理的長さの正解値を知ることが主観的長さに影響しないように、所持する手荷物の中身は被験者に見えないようにした。この実験により、1 被験者につき 30 パターンの歩行時の 3D 人物骨格系列を撮影した。また、全実験参加者は撮影データの研究目的での利用・公開に同意した。

3.2 実験手順

本実験では、手荷物の種類ごとに物理的長さの主観的長さの推定を評価した。評価実験の評価指標として、推定結果に対する平均誤差 M_p を用いた。

$$M_p = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y - \hat{y}| \quad (4)$$

ここで、 N は評価データ数を表し、 y と \hat{y} はそれぞれ評価データにおける物理的長さ又は主観的長さの真値と推定値を表す。本実験ではデータセット中の 12 人の被験者のうち、1 人を評価用、11 人を学習用として leave-one-out cross validation により精度を求めた。提案手法における 3D 人物骨格系列からの特徴を身体特徴と動作特徴へ分離することによる効果を確認するため、提案手法を MS-G3D のみを用いて物理的長さの主観的長さをそれぞれ推定するベース

表 1: 各手荷物種類での物理的重さ推定値の真値との平均絶対誤差 (kg)

	手提げ鞆	肩さげ鞆	リュックサック	段ボール	買い物かご	平均
ベースライン	2.97	2.12	3.55	3.74	2.46	2.97
提案手法	2.94	2.47	3.67	3.29	2.45	2.96

表 2: 各手荷物種類での主観的重さ推定値の真値との平均絶対誤差 (点)

	手提げ鞆	肩さげ鞆	リュックサック	段ボール	買い物かご	平均
ベースライン	16.91	14.17	19.86	19.02	17.25	17.44
提案手法	18.44	15.57	22.27	19.32	15.70	18.26

ラインと比較した。データセットに含まれる歩行 1 周期分の 3D 人物骨格系列は全体で 2,108 周期と少なかったため、系列から固定長分ランダムにフレームを抜き出す処理を繰り返すことで、データ量を 100 倍とした。

3.3 実験結果

表 1 に手荷物の物理的重さ推定値の真値との平均絶対誤差を、表 2 に主観的重さ推定値の真値との平均絶対誤差を示す。実験結果から、手荷物の物理的重さは平均絶対誤差 2.96kg で、主観的重さは平均絶対誤差 17.44 点の精度で推定できることが分かった。

3.4 考察

物理的重さ推定では、提案手法がベースラインよりも高精度な場合が多いため、特徴を身体特徴と動作特徴に分離して推定することが有効であることが分かる。

今回の実験で使用した主観的重さの評価の指標には、20kg の手提げ鞆を持つという物理的な基準と、助けが欲しいと感じる重さという主観的な基準が混在していた。これでは、物理的な基準と主観的な基準のどちらを重要視するか人によって点数のつけ方が変わってしまい、結果として主観的重さ推定の精度があまり良くなかったと考えられる。そのため、今後は主観的重さの指標を、New Borg Scale [6] など、主観的な基準に統一する方が良いと考えられる。

さらに今回の実験では、人物ラベルに基づいた身体特徴の抽出や排除を行ったが、人物ラベルのみでは、身体特徴に影響がある体重や筋力等の類似性を表現することはできない。そのため、体重や筋力等の類似性も考慮して身体特徴を抽出することで推定の向上が見込める。

最後に、今回の研究に使用した歩行時の 3D 人物骨格系列は Azure Kinect SDK を用いて推定したが、服装の影響により推定に失敗する場合があった。本研究では手作業により推定に失敗した系列を排除したが、実用の際はこのような推定に失敗した 3D 人物骨格系列を使用しないようにするシステムが必要であると考えられる。

4. おわりに

手荷物を重そうに持っている人をロボットがさり気なく支援するためには、支援を行う際の判断材料とするため、手荷物の実際の重さである物理的重さと、その人がどのくらい重いと感じているかを表す主観的重さの推定が有用である。本研究では、歩き方の特徴から手荷物の物理的重さと主観的重さを推定する手法を提案した。提案手法では、歩き方の特徴から身体特徴と動作特徴をそれぞれ求め、重さの種類に応じて特徴を選択することで、身体特徴の違いを考慮した推定を実現した。

今後の課題として、主観的重さの評価指標の見直し、身体特徴の類似性に着目した推定が挙げられる。

5. 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 (17H00745) による。

参考文献

- [1] 湯口 彰重, 河野 誠也, 石井 カルロス 寿憲, 吉野 幸一郎, 川西 康友, 中村 泰, 港隆 史, 齊藤 康己, 美濃 導彦, “ぶつくさ君: 自身の外界認識と内部状態を言語化するロボット”, 第 39 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Sep. 2021.
- [2] E. Hyung, H. Lee, Y. Kwon, “Influence of load and carrying method on gait,” Proc. Gait and Posture, Vol.22, no.1, pp.63-68, Aug. 2005.
- [3] Z. Liu, H. Zhang, Z. Chen, Z. Wang, W. Ouyang, “Disentangling and Unifying Graph Convolutions for Skeleton-Based Action Recognition,” Proc. of IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.143-152, June. 2020.
- [4] 山口優太, 神谷卓也, 西山正志, 岩井儀雄, “身体動揺を用いた重量物所持の認識可能性の検証”, ビジョン技術の実用ワークショップ講演論文集, no.IS2-A1, pp.1-5, Dec. 2019.
- [5] Y. Ganin, E. Ustinova, H. Ajakan, P. Germain, H. Larochelle, F. Laviolette, M. Marchand, V. Lempitsky, “Domain-Adversarial Training of Neural Networks”, J. of Machine Learning Research, vol.17, pp.1-35, May. 2016.
- [6] G. A. Borg, “Psychophysical bases of perceived exertion,” Medicine & science in sports & exercise, 14(5), pp.377-381, 1982.