

メタボリックシンドローム診断のための腹部形状解析

齊藤 仙一[†] 佐藤 幸男[†]

[†]慶應義塾大学大学院理工学研究科

メタボリックシンドロームの診断基準のひとつにウエスト周囲径のメジャー計測があるが、ウエスト周囲径と内臓脂肪面積との間の科学的根拠の有無が問題となっており、現在も盛んに研究が行われている。そこで本研究では腹部の形状そのものに着目し、内臓脂肪面積評価を行う手法を提案する。腹部形状の取得には、短時間、高精度、非接触に計測できる3次元形状計測装置を用いる。これを用いて腹部形状を解析し、内臓脂肪特有の形状特徴量を抽出し、内臓脂肪面積推定式を算出する。また、実験により従来のウエスト周囲径による内臓脂肪面積評価との比較を行い本手法の有用性を示す。

Abdominal Shape Analysis for Diagnosis of Metabolic Syndrome

Senichi SAITO[†], Yukio SATO[†]

[†] Graduate School of Science and Technology, Keio University

The major measurement of the waist circumference diameter is one of the diagnostic criteria of the metabolic syndromes. We propose a method for estimating visceral fat area by analyzing abdominal shape. We use a three-dimensional shape measurement device for the acquisition of the abdominal shape. In this method, we extract abdominal shape characteristics that might act as a marker for the metabolic syndrome. And we estimate visceral fat area from these characteristics by a regression analysis. Experimental results show that our method can estimate visceral fat area accurately than the waist circumference diameter.

1. まえがき

メタボリックシンドロームとは内臓に脂肪が蓄積する肥満に加えて高血糖、高血圧、高脂血症が重なる状態をいい、心筋梗塞や糖尿病のリスクが高まるとされている。必須項目のウエスト周囲径に加え、選択項目のうちの2つ以上が加わればメタボリックシンドロームと診断される。診断基準は日本肥満学会などの「メタボリックシンドローム診断基準検討委員会」で議論され、2005年にとりまとめられた[1]。2006年5月に厚生労働省が発表した推計によれば、40~74歳で有病者と予備軍を合わせると、男性の2人に1人、女性の5人に1人が該当するという。こうした背景からマスコミ等に取り上げられメタボリックシンドロームは日本中に影響を与えている。例えば、地方自治体ではメタボ予防講座や、対策室が設置され食生活と運動が指導されている。また、予防・改善ビジネスに進出する企業も相次いでおり、健康指導サービスの充実が図られている。さらに特定健康食品の売り上げも大幅に上がっている。このようにメタボリックシンドローム関連の市場は急拡大しており、2007年の市場規模は7兆5000億円を超えている。市場調査によると、この急拡

大は今後も続くと思定されている。

一方で診断基準のひとつにウエスト周囲径のメジャー計測があるが、ウエスト周囲径と内臓脂肪面積との間の科学的根拠の有無が問題となっている[2][3][4][5][6][7][8]。また、正確な内臓脂肪面積評価として用いられているX線CT計測は、装置が高価であることや、被曝の危険性があり問題となっている。以下に現状の腹部内臓脂肪面積評価の問題点を示す。

X線CT計測

1. 装置が高価
 2. 度重なる撮影は被曝の危険性
- メジャーによるウエスト周囲径測定
1. 精度、再現性に問題
 2. CT内臓脂肪面積との相関係数は0.6~0.7程度
 3. 人での計測による受診者への抵抗感

現在、内臓脂肪評価に対する最適な診断方法はX線CT計測であるが、コストの問題を考慮すると定期的に実施することは困難である。また、経過観察のための頻繁なX線CT計測は被曝の点からも問題があると考えられ、最適とは言い難い。一方、ウエスト周囲径が基準値未満でも内臓脂肪が蓄積している例が見さ

れるために、ウエスト周囲径の計測では信頼性に乏しい[13].

そこで本研究では、腹部の形状そのものに着目し、内臓脂肪面積評価を行うことを目的とする。腹部形状は3次元形状計測によって取得する。3次元腹部形状計測の有用性を以下に示す。

1. 非接触、高精度、短時間に計測可能
2. 3次元画像から腹部の形状、周囲長、体積などを瞬時に抽出可能
3. 視覚的効果による受診者への指導効果向上

3次元形状計測はX線CT計測に比べ安全で簡便な計測が可能である。取得された腹部形状から、内臓脂肪蓄積の指標となりうる特徴量を選別し、それらの特徴量から内臓脂肪面積を推定する。腹部形状と内臓脂肪面積との関係性を明らかにすることにより、ウエスト周囲径に変わる新たなメタボリックシンドローム診断基準が得られる可能性があると考えられる。

2. 腹部3次元形状計測システム

本手法で用いる腹部3次元形状計測システムを図1に示す[9][10]。本システムには2台のレンジファインダを使用する。ボール1本に1台のレンジファインダを設置し、そのボールを2本利用して、撮影する人体の正面と背面に配置する。各レンジファインダの位置関係はキャリブレーション済みであり、それぞれのレンジファインダで計測された形状データを統合することで、腹部全体の形状データを取得することができる。

また本システムにより取得される形状データを図2に示す。形状データは3次元空間上の頂点の集合として得られる。

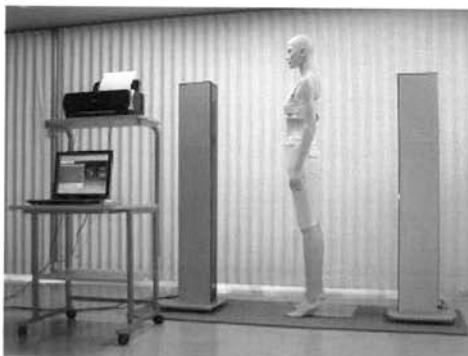


図1 計測システム



図2 形状データ

3. 手法の概要

本研究の目的は腹部形状と内臓脂肪面積の関係を解析することである。代表的な内臓脂肪の評価法にウエスト周囲径とX線CT計測があるが、いずれの方法も臍の高さを基準に測定が行われている。臍の位置は腹部形状の重要な特徴であるので、本研究でも臍断面の形状を解析対象とする。

そこでまず計測された腹部形状において臍の位置を指定し、そこを通る水平断面を臍断面として抽出する。これで断面形状は2次元平面上の頂点の集合として表現される。本研究では断面形状を複素平面上の輪郭線として扱う。輪郭線上を単位時間で一周する動く点を考え、時間 t における関数 $f(t) = x(t) + iy(t)$ として表現する。

次に、前処理として正規化を行う。重心で位置の正規化、対称軸に向きの正規化を行う。

続いて、輪郭形状から固有の形状特徴量を抽出する。そのためにまず輪郭形状をフーリエ記述子によって表現する。フーリエ記述子は輪郭形状の定量的評価法のひとつである[12]。これは輪郭の座標情報を周期関数として表し、そのフーリエ級数の係数によって形を記述する手法である。次にそのフーリエ係数を主成分分析し、形状特徴量を抽出する。本研究でフーリエ記述子を用いる理由は、主に次の2点である。

(1) 本研究では対象となる形状が曲線であることから表現関数 $f(t)$ は一般に t に関して非常に滑らかな周期関数として与えられ、 $f(t)$ を t に関してフーリエ級数展開した場合、その係数は急速に収束することが期待できること。

(2) 係数の値から逆に輪郭を構築できること。この性質を利用することにより、主成分として抽出された形の特徴を視覚的に表現することができる。これにより、通常の主成分分析では難しい各主成分の意味の解釈が容易になる。

最後に、抽出された形状特徴量から内臓脂肪蓄積の

指標となりうる特徴量を選別し、それらの特徴量から内臓脂肪面積を推定する。選別の教師データとしてX線CTによる内臓脂肪面積を用いる。

本手法の流れを図3に示す。

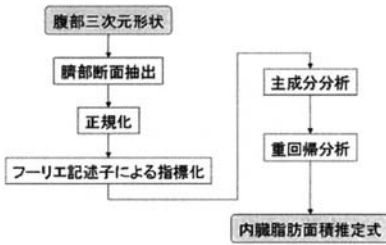


図3 処理の流れ

3.1. 対称軸抽出

断面形状を個人間で比較するために位置合わせを行う。人体の構造から断面形状は対象図形になると考えられる。本研究では断面の対称軸を算出して位置合わせを行う。対称軸の算出は、図形の回転を利用した手法で行う[14]。本研究の被験者の対称軸抽出結果を図5に示す。結果は内臓脂肪が多い順に並べられている。

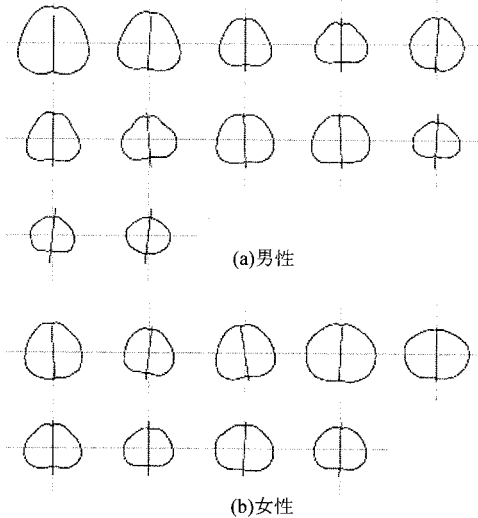


図4 対称軸抽出結果

3.2. フーリエ記述子による輪郭形状の評価

本研究ではフーリエ記述子により輪郭形状の定量的評価を行う。理由については3.で述べたが、ここでは具体的な手法について述べる。フーリエ記述子を用いると表現関数は式(1)で表される。

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c(t)e^{i2\pi kt} \quad (1)$$

ここで、 $c(t)$ は $f(t)$ のフーリエ係数である。これらフーリエ係数は、輪郭の向きや大きさ、さらには出発点の位置により値が変化する。そこで係数について標準化を行う。まず、輪郭の大きさについてであるが、本研究において内臓脂肪面積と関連性を持つ特徴であると考えられるため、あえて標準化は行わない。また、輪郭の向きは3.1.の対称軸によって補正されているためもう標準化の必要はない。出発点の位置は、輪郭と対称軸の交点のうち臍側の交点で標準化する。これによって個人間のフーリエ係数の直接比較が可能となる。

本研究で使用する腹部断面形状の1断面あたりの頂点数は360である。ここでフーリエ係数の低次成分のみから輪郭を再構成し情報圧縮を行う。本研究では再構成形状と元形状の平均二乗誤差が1mm以下となる12次までの成分を使用する。次数と平均二乗誤差の推移を図5に示す。これにより1断面が48個のフーリエ係数で表されることになる。

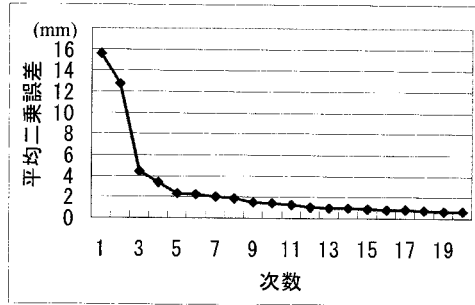


図5 再構成次数と平均二乗誤差の推移

3.3. 主成分分析による特徴抽出

臍断面の輪郭形状のフーリエ記述子から形状特徴量を抽出するために、主成分分析を行う。フーリエ係数 $c(t)$ の次元数を n とすると、主成分分析により算出される第 p 主成分得点 s_p は、

$$s_p = \sum_{t=1}^n v_p t(c(t) - \overline{c(t)}) \quad (2)$$

で表される。ここで、 $V_p = (v_p1, v_p2, \dots, v_pn)$ は第 p 固有ベクトル、 $\overline{c(t)}$ は全データの平均である。本研究では特徴量の次元数削減のため、累積寄与率が90%以上になるように低次元の主成分得点を用いる。

4. 実験と結果

本手法の有用性を示すために腹部形状から内臓脂肪面積を推定する実験を行った。本実験では関西医科大学健康科学センターの協力を得て、肥満外来受診者 21 名を被験者とした。腹部 3 次元計測と同時期に X 線 CT 計測を行い内臓脂肪面積と皮下脂肪面積を測定した。表 1 にデータの平均値を示す。

表 1 被験者平均データ

	男性	女性
人数	12	9
身長(cm)	166.1	158.3
体重(kg)	76.8	76.1
内臓脂肪面積(cm ²)	139.6	141.5
皮下脂肪面積(cm ²)	196.2	291.5
BMI	27.7	30.2

4.1. 形状特徴量とその意味

臍断面形状から抽出された各主成分の意味を検討するために、主成分得点と CT による内臓脂肪面積、皮下脂肪面積との相関係数を求めた。その結果を表 2 に示す。第 2 主成分は内臓脂肪との相関が 0.68 と高い相関を示した。しかも皮下脂肪との相関がほぼ 0 となり、皮下脂肪の影響を受けていないことがわかった。つまり、第 2 主成分は内臓脂肪のみとの関連性が強い特徴量であるといえる。また、第 7 主成分は逆に皮下脂肪のみとの関連性が強い特徴量であるといえる。

次に、各主成分の意味の視覚化を行った。第 i 主成分以外の主成分得点を 0 に固定し、第 i 主成分については $-2\sigma_i, 0, 2\sigma_i$ の 3 通りに主成分得点の値を変化させて、それぞれの場合でフーリエ係数から断面形状を再構成した。ここで σ_i は第 i 主成分の固有値の平方根であり、主成分得点の標準偏差である。なお、すべての主成分得点を 0 として再構成した断面形状は、全データの平均形状となる。再構成された断面形状の結果を図 6 に示す。主成分得点の値が $-2\sigma_i, 0, 2\sigma_i$ の順に点線、破線、実線で示した。

表 2 主成分得点と各脂肪面積の相関係数

	内臓脂肪面積	皮下脂肪面積
PC1	0.21	-0.10
PC2	0.68	-0.02
PC3	0.18	0.32
PC4	-0.11	0.12
PC5	-0.25	0.10
PC6	-0.08	0.06
PC7	-0.05	-0.74
PC8	-0.37	0.01

4.2. 内臓脂肪面積推定式の精度

抽出された形状特徴量から内臓脂肪面積を推定する計算式を算出した。フーリエ係数から抽出した各主成分得点を独立変数、X 線 CT による内臓脂肪面積を従属変数として重回帰分析した。内臓脂肪蓄積の指標となるべき主成分のみを選択するために、独立変数の選択にはステップワイズ法を用いた。算出された内臓脂肪面積推定式を式(3)に示す。

$$\begin{aligned} \text{推定内臓脂肪面積}(cm^2) = & 14.73 \times PC2 - 18.69 \times PC8 \\ & - 8.85 \times PC5 + 3.55 \times PC1 \\ & + 140.44 \end{aligned} \quad (3)$$

次に内臓脂肪推定式の精度評価を行った。現状のメタボリックシンドローム診断では、ウエスト周囲径からの内臓脂肪面積推定を行っている。本手法と従来手法の比較を行うために、ウエスト周囲径から内臓脂肪面積への単回帰分析を行い、従来手法の内臓脂肪推定式を算出した。両手法の推定内臓脂肪面積と CT による内臓脂肪面積の散布図を図 7 に示す。また両手法の内臓脂肪推定式の精度比較を表 3 に示す。

表 3 内臓脂肪推定式の精度比較

	相関係数	標準誤差	皮下脂肪面積との相関係数
提案手法	0.84	38.7	-0.07
従来手法	0.57	54.1	0.79

内臓脂肪面積との相関係数については、従来手法が 0.57 であるのに対し、提案手法では 0.84 と高い値になった。また標準誤差については、従来手法よりも提案手法の方が小さくなった。

皮下脂肪面積との相関係数については、従来手法は 0.79 と高い値となった。しかもこれは内臓脂肪面積との相関係数より高い値となっているため、従来手法は内臓脂肪面積だけでなく皮下脂肪面積も相当反映されていることが観察された。つまり従来手法では純粋な内臓脂肪評価ができていない可能性が考えられる。それに対し、提案手法は -0.07 とほぼ 0 に近い値となった。つまり、提案手法は純粋に内臓脂肪のみを評価できていることが観察された。

以上より、提案手法は皮下脂肪の影響を受けず、純粋に内臓脂肪のみを評価することができ、さらに従来手法より高精度に内臓脂肪面積を推定できることが確認された。

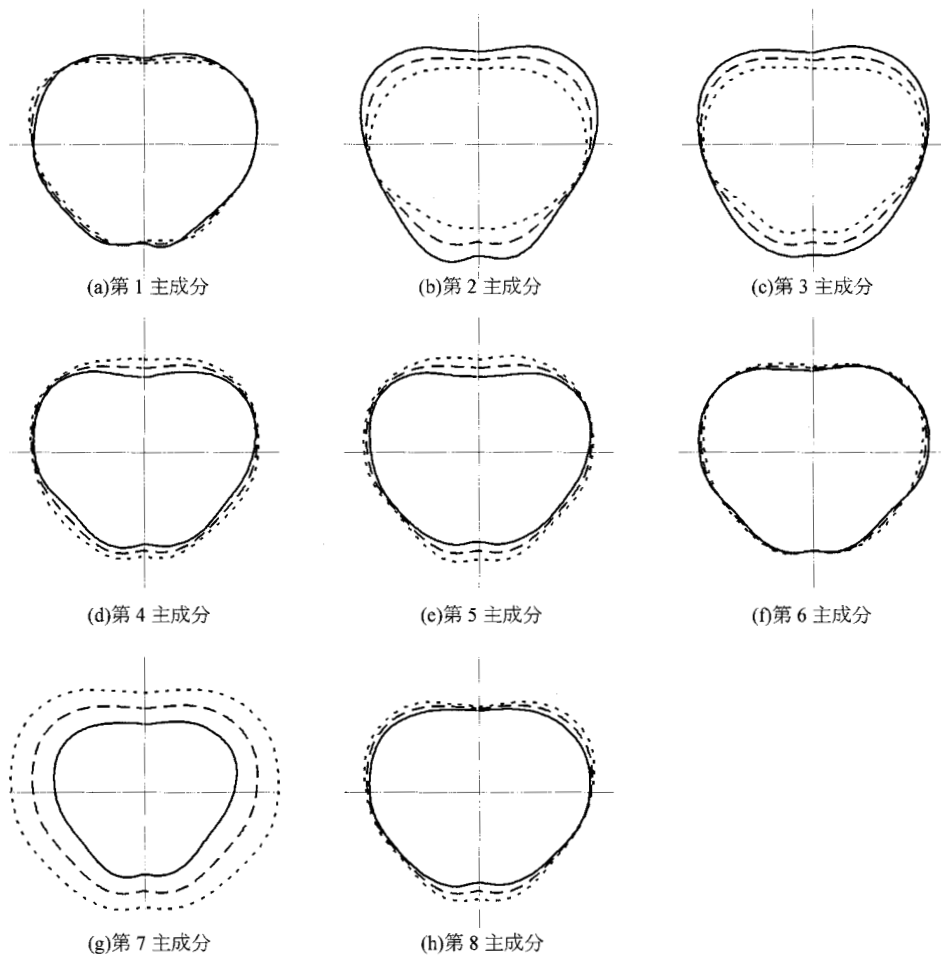


図6 主成分の視覚化

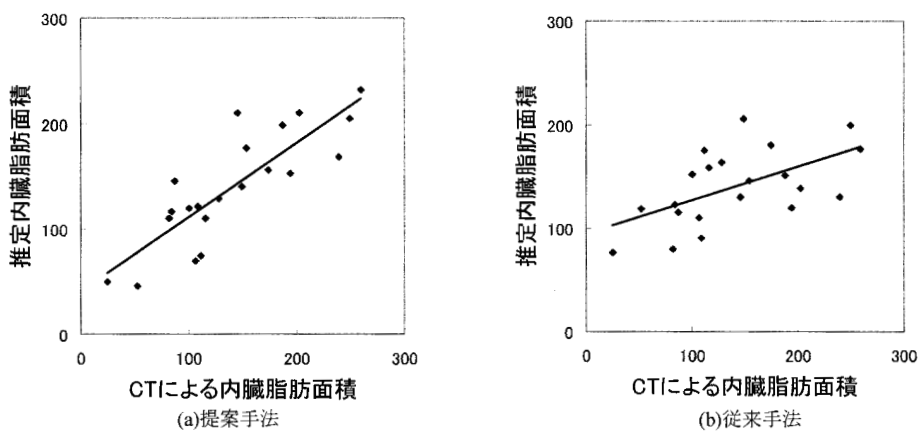


図7 内臓脂肪面積の散布図

5. 結論

本論文では、メタボリックシンドローム診断における新たな内臓脂肪面積評価のために、腹部の形状に着目し、臍断面形状から内臓脂肪面積を推定する手法を提案した。本手法では臍断面のフーリエスペクトルを主成分分析することにより、内臓脂肪面積、皮下脂肪面積のみと相関の高い特徴量を抽出した。また、それらの特徴量と内臓脂肪面積との重回帰分析により、臍断面形状から内臓脂肪面積を推定した。

実験では、現状のメタボリックシンドローム診断の内臓脂肪面積評価法であるウエスト周囲径より、提案手法の方が有用であることが観察された。

今後の展望としては、まずデータ数を増やすことによる推定精度の向上が挙げられる。特に、健康な人のデータを加えることにより新たな特徴量が抽出できる可能性がある。また、内臓脂肪面積だけでなく血液データ等との関係性を解析することにより、肥満と腹部形状の新たなエビデンスが得られることが期待される。

本研究において様々な御助言、御協力を賜りました慶応義塾大学大学院理工学研究科斎藤英雄教授、貴重な研究データを提供していただいた関西医科大学木村稔准教授に深く感謝致します。

文 献

- [1] メタボリックシンドローム診断基準検討委員会, “メタボリックシンドロームの定義と診断基準,” 日本内科学会雑誌, vol.94, no.4, pp.794-809, Apr.2005.
- [2] 佐藤きぬ子, 水留伸子, 木村礼子, 埴なぎさ, 大芦研輔, 道家充, “腹囲測定と内臓脂肪面積測定結果からみたメタボリックシンドロームの検討,” 人間ドック, vol.22, no.2, p.272, Aug.2007.
- [3] 善積透, 竹村芳, 市原紀久雄, 中村正, 太江田勲, 佐々木公祐, 今井靖浩, “メタボリックシンドロームに関する研究 内臓脂肪蓄積指標立位ウエスト周囲径の妥当性について,” 人間ドック, vol.22, no.2, p.272, Aug.2007.
- [4] 宮崎博子, 星野立夫, 越智次郎, 田辺光子, 坂井三里, 須見真喜子, 山下幸枝, 奥村陽子, 大濱正, “メタボリックシンドロームにおける腹囲と内臓脂肪の関連性,” 人間ドック, vol.22, no.2, p.213, Aug.2007.
- [5] 岡田実, 藤原正則, 村岡勝美, 田中セツ子, 三澤潤, 和田亮一, 光島徹, 前田隆, 中川徹, “メタボリックシンドロームにおける腹囲と内臓脂肪量についての検討,” 人間ドック, vol.22, no.2, p.214, Aug.2007.
- [6] 松村憲太郎, “内臓脂肪面積とウエスト径, body mass index(BMI)との相関に関する検討,” Circulation Journal, vol.71, p.881, Jan.2007.
- [7] 平川貴子, 杉謙一, 西方宏昭, 古賀龍彦, 岩瀬正典, 飯田三雄, “腹囲と内臓脂肪面積, メタボリックシンドロームの関連について,” 糖尿病, vol.50, no.1, p.90, Jan.2007.
- [8] 善積透, 中村正, 木村紘也, 青山毅, 太江田勲, 両角政宣, “メタボリックシンドロームに関する研究 内臓脂肪蓄積指標立位ウエスト周囲径の妥当性について,” CT 検診, vol.14, no.1, p.27, Jan.2007.
- [9] 山内航一郎, 柴田進, 佐藤幸男, “多視点距離画像を用いた人体の三次元形状計測システム,” 電子情報通信学会, vol.J88-D-2, no.8, pp.1564-1572, Jan.2005.
- [10] SPACEVISION Incorporated, “Handy 3D Camera Cartesia,” <http://www.space-vision.jp/>.
- [11] Yukio Sato and Ikuji Honda, “PSEUDODISTANCE MEASURES FOR RECOGNITION OF CURVED OBJECTS,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.5, no.4, Jul.1983.
- [12] G.H. Grunlund, Fourier Preprocessing for Hand Print Character Recognition, IEEE Trans.Comput., vol.C-21, no.2, pp.195-201, 1972.
- [13] 傳秋光, 岡部修一, 山下修司, 増田安俊, 谷口洋, “中年非肥満男性における内臓脂肪蓄積の発見のための回帰分析による内臓脂肪面積の推定法,” 神戸大学医学部保健学科紀要, vol.18, no.8, pp.149-159, Dec.2002.
- [14] 飯田利彦, 石川尋代, 佐藤幸男, “3次元人体形状の姿勢評定,” 電子情報通信学会, vol.2007, no.2, p.184, Mar.2007.