

接触式指紋センサーと指紋の弾性モデルに関する一検討

上田 周誠^{1,a)} 井沼 学^{2,b)} 大塚 玲^{3,c)} 今井 秀樹^{1,d)}

概要：筆者らは、指の3次元測定データから接触式指紋センサーの測定データを生成することを目的として、接触式指紋センサーに指を押し当てた際に生じる歪みを予測する指紋の弾性モデルの検討を行っている。指紋の弾性モデルでは既に Cappelli ら、Bazen らによる先行研究等がある。本稿では指紋測定の際に様々な応力／圧力を加える実験を行い、その測定結果から Cappelli ら、Bazen らのモデルの妥当性の検証を行った。実験の結果、指紋が接触式指紋センサーに接触した際に生じる歪みには多様性があり、特殊な場合を除いて Cappelli らの単純化された楕円領域モデルでは十分に予測できないことを確認した。

1. はじめに

生体認証とは、指紋や静脈、歩き方などの生体的特徴を用いて個人を認証する技術のことである。パスワードや鍵など同様に、対象の正当性を確認するために使用される。最近ではその利用が広まっており、交通や銀行などで実際に運用されている。

その生体認証の評価は、実際に人間から採取した生体情報のデータベースを使って行われる。

現在、日本国内には、公開データベースが十分に存在しているとは言えず、日本国内の各機関は、独自で収集した非公開データベースや海外公開データベースを用いて生体認証機器の性能評価実験を行っている。しかし、非公開データベースは、外部研究機関がそれを用いて評価できないなどの理由からデータベースとして十分高い評価が得られにくい。一方、海外データベースを用いた評価は、日本人を対象とした性能評価ができない、評価したい条件を細かく設定できない、自国の充実した評価体制をアピールできない等の問題がある。これらの問題を解決するため、日本国内外の企業・研究機関に広く公開され、その有用性・客観性が

認められた公開データベースを日本国内に構築することが重要である。我々は、公開データベースを日本国内に構築するため、Ground Truth を用いたデータベース構築に焦点をあてた。

生体認証における Ground Truth とは、生体認証に利用される個人の生体部位あるいは行動の真の特徴情報である。しかし、真の特徴情報をそのままデータとして扱うことは、現実的に不可能である。そこで、Ground Truth を現実世界における一般的なモダリティに適用可能なものとして定義しなおす必要がある。指紋、静脈などといった一般的なモダリティにおける Ground Truth とは、あるモダリティの生体情報における通常の読取装置よりも遥かに高精度な計測器 M (読取装置と特徴抽出アルゴリズム) であればよいと定義する。

そこで、本論文では、通常の読取装置よりもはるかに高精度な読取読みで取得した生体情報を Ground Truth として定義する。そして、Ground Truth データベースを用いた性能評価に注目する。

通常の読取装置で取得した生体情報データベースによって照合アルゴリズムの性能評価を行った場合、どうしてもデータ採取に用いた読取装置に依存した評価になってしまう。また、新技術を導入した読取装置が普及し、現在の読取装置が旧式となった場合は、データベースを再構築しなければならない。そこで、Ground Truth データと併せて、各種生体部位や計測に応じたノイズモデルを構成し、アルゴリズム評価の際には、Ground Truth データにそれぞれのノイズモデルを付加して生成したサンプルデータベースを用いて評価する。この評価方法の利点は、種々の精度や方式の計測、様々なノイズモデルを考慮した多角的な評価が可能となること、また、技術が進んで新たな読取装置が普及

¹ 中央大学 理工学部
Department of Electrical, Electronic, and Communication Engineering, Faculty of Science and Engineering, Chuo University, 1-13-27 Kasuga Bunkyo-ku 112-8551 Tokyo, Japan
² 城西大学理学部数学科
Department of Mathematics, Faculty of Science Josai University, Keyakidai 1-1, Sakado, Japan
³ 産業技術総合研究所
Advanced Industrial Science and Technology, Umezono Tsukuba-shi Ibaraki 305-8568, Japan
a) ueda-shusei@imailab.jp
b) inuma@josai.ac.jp
c) otsuka@ni.aist.go.jp
d) h-imai@imailab.jp

したとしても、ある程度の期間はノイズモデルを更新してデータを生成することでそれを生じた性能評価が可能となることなどである。さらには、Ground Truth による評価と比較することにより、複数の読取装置（またはそれらが出力したサンプルデータ）のうち、どの装置（またはサンプルデータ）がよりよく真の生体情報を計測できているかといった、装置（またはサンプルデータ）の評価を行うことも可能である。

本論文では、とくに、指紋の Ground Truth として 3 次元スキャナーを用いて取得した 3 次元指紋データに着目する。そして、そのような 3 次元指紋データから、評価用の 2 次元指紋データを生成するため、以下のような 2 段階の射影を考える（図 1 を参照）：

- (1) 3 次元スキャナで採ったデータを各読み取り器に対応したノイズなしの 2 次元指紋画像に変換する射影 ϕ_1
- (2) 生成したノイズなしの 2 次元指紋画像を歪みや画像の濃淡などといった様々な状況に応じたノイズを付加させた 2 次元指紋画像に変換する写像 ϕ_2

Ground Truth による認証機器の性能評価では、計測方法・観測環境に応じたノイズモデルを構築する部分が非常に重要な部分を占めている。我々は、接触式指紋センサーにおけるノイズの一つである歪みに着目した。今日までに、接触式指紋センサーで取得した歪みの影響を受けた指紋画像あるいは特徴情報を自然な状態に補正する様々なモデルが提案されている。例えば、2001 年に R. Cappelli ら [1] が提案した方式では、可塑性を有する指モデルをセンサーに自然に押し当てたときとその押し当てた状態から中心を軸に歪ませたときの指紋画像と特徴情報を採取し、中心を軸に歪ませたときの指紋の特徴情報を自然に押し当てた状態に戻す補正案が提案されている。採取された指紋画像を重ね合わせて、指紋画像を比較すると、指紋画像の中心から a, b, c の順に 3 層のある領域に分けることが出来、a の領域にある特徴情報は、特徴情報が不変であり、b, c の領域の特徴情報は、それぞれ歪みに適したアフィン変換で補正できると結論付けられている。この方法は、a の領域で指紋がセンサー測定面に接着して不動領域を形成し、c の領域では指に加わった変形応力により測定面に対して一様に滑ることを仮定した、やや限定的な力学モデルに対応している。Bazen ら [2] は、接触式指紋センサーによる指紋の変形を考慮したマッチングアルゴリズムを提案している。そ

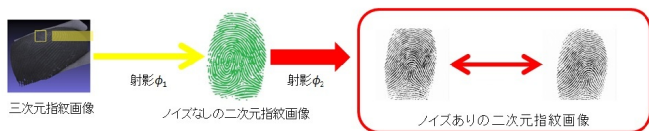


図 1 3 次元高精細指画像からの 2 次元指紋画像への射影のプロセス。

の中で、許容誤差の下で良い対応関係を示すマニューシャ群を基準として、誤差を修正する方向にマニューシャ間を Thin-Plate Spline 関数により滑らかに変形させることでマッチング精度を高める方法を提案している。この方法は自由度が高い Thin-Plate Spline 関数で指紋の変形をモデル化するため、Ground Truth から指紋を生成するためのノイズモデルとして用いると指紋に不自然な変形を導入してしまう問題がある。

そこで、本稿では、接触式指紋センサーに押し当てたときの指腹部の力学的変化（指腹部の歪み）を Optical Flow という手法を用いて観察した。指腹部の力学的変化をみるために、実際に接触式指紋センサーに指を軽く押し当てたときの状態から徐々に圧力を垂直方向へ入れたときの指紋画像を細かく採取した。次に、それぞれの指紋画像に対して Optical Flow をほどこし、Optical Flow が算出する特徴点から圧力による特徴点の変化を観察した。取得された指紋画像は、押し当てる圧力が変化することにより、ある領域は変化せず、ある領域は一定の弾性変化がみられると同時に一定の弾性変化がみられる領域には、局所的な歪みもみられることがわかった。

さらに、本稿では、論文 [1] を実装し、加重開始時の特徴点を加重終了時の特徴点に補正し、実際の加重終了時の特徴点と論文 [1] で補正した特徴点の比較をした結果、特徴点の差の二乗の誤差の平均が 112.952 となり、論文 [1] は、歪みに対する補正が不完全であることが確かめられた。

2. 既存研究の概要

2002 年に R. Cappelli ら [1] が提案した方式は、プラスチック製の指モデルをセンサーに押し当てて歪ませた状態から押し当てて歪ませる前の状態に戻す補正案が提案されている。まず、センサーにプラスチック製の指モデルを押し当てて指紋画像を採取する。次に押し当てた状態から中心を軸に左右どちらか一方にねじらせた指紋画像を採取する。両方の指の断面図を図 2 に示す。また、両者の指紋画像を比較すると図 2 のように、指紋画像の中心から a, b, c の順に 3 層のある領域に分けることが出来る。

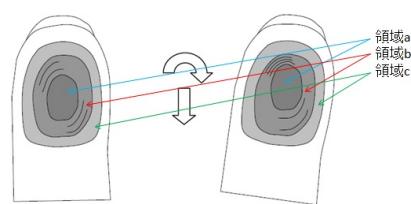


図 2 牽引（収縮）やねじれの適用前と後の指の断面図。（[1] 引用）

a の領域は、図 3 の白線の円で囲まれた部分で、マニューシャがほとんど変化しない領域である。b と c の領域は、図 3 の白線から外側の領域である。a の領域は、歪ませる前の指紋画像と歪ませたあとの指紋画像を重ね合わせることで a の領域を見つけており、サンプルによって a の領域の大きさは異なるが一種の楕円に近い形となっている。

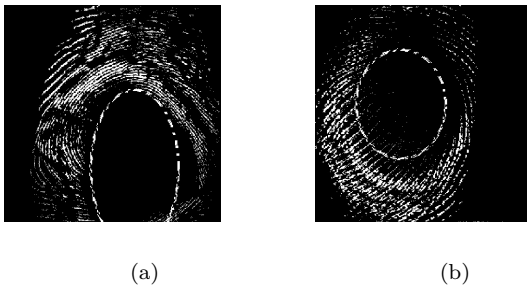


図 3 (a), (b) 自然な状態と歪ませたときの指紋画像を重ね合わせたもの。 ([1] 引用)

R. Cappelli らは、[1] において、a の領域と a の外の領域で以下のように定義をしている。

$$Shapedist_a(v) = \begin{cases} 0 & \text{a の領域内,} \\ dist_a & \text{a の領域外,} \end{cases} \quad (1)$$

$dist_a$ が、楕円に近似することができる場合 $dist_a$ は、 $dist_{ell}$ として以下のように新しく定義している。

$$dist_{ell}(v) = \sqrt{(v - C_e)^T A^{-1} (v - C_e)} - 1$$

$$C_e = \begin{pmatrix} C_x \\ C_y \end{pmatrix} \text{ and } A_x = \begin{pmatrix} S_x^2 & 0 \\ 0 & S_y^2 \end{pmatrix}$$

C_e は、楕円の中心の xy 座標、 A_x は、楕円の長径と短径 (S_x, S_y) の二乗を用いた行列式である。

c の領域は、図 4 のように a の領域の外側に現れる領域であり、ねじれが弱い場合、図 4 の右側のような a と c だけの二つの領域を取り、c の領域の特徴点を一つの最適なアフィン変換によって補正することができる。ねじれが強い場合、図 4 の左の図のように a の領域と c の領域を滑らか結ぶ b の領域が現れる。b の領域は、新たに定義する $distortion(v)$ という関数でねじれを回転補正することができ、c の領域を緩やかに結ぶように補正する。

$$distortion(v) = v + (v)brake(shapedist_a(v), k)$$

$$brake(t, k) = \begin{cases} 0 & \text{if } t < 0 \\ \frac{1}{2}(1 - \cos(\frac{t\pi}{k})) & \text{if } 0 \leq t \leq k \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v = (x, y), d = \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix}, R_\theta = \begin{pmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ -\cos \theta & \sin \theta \end{pmatrix}$$

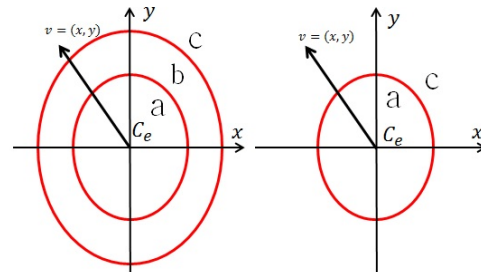


図 4 領域のイメージ図。

3. 実験手法

3.1 認証装置及び実験装置について

本実験には SecuGen 製の接触式指紋センサー ハムスター Plus を用いた。本稿では、以下「読取器」と呼称する。読取器は、PC に接続されており、任意のタイミングで指紋を採取することができるようになっている。また、指紋認証する際の指の圧力の具合を確かめるために TANITA 製のデジタルスケールを用いた。本稿では、以下「量り」と呼称する。

被験者は著者自身で著者の右中指を使って実験を行った。

3.2 実験方法について

指を垂直に押し当てたときの状態の変化をみるために、まず図 5 のように読取器を量りの上においた。この状態を 0g とする。次に図 6 のように右中指を読取器に正面から垂直に押し当てた。この時量りが 60g を示すように指で掛ける圧力を調節し、ここで一回目の指紋画像の採取を行った。そして、この状態を維持したままできるだけ垂直方向に指の力を徐々に掛けた。はかりが 20g 増えるごとに指紋画像を採取し、量りが 400g を示すまで指の力を掛け続けて合計 18 枚の指紋画像を採取した。これを 1 セットとする。また、右中指も同様に作業を行い 18 枚の画像を採取した。この作業を各指 10 回ずつ行い、右人差し指と右中指で合計 360 枚の指紋画像を採取した。

次に、1 セットごとに Optical Flow を施し、特徴点の推移を観察する実験を行った。

3.3 Optical Flow による特徴点追跡

1 セット 18 枚の採取した指紋画像に対して、Optical Flow を用いて特徴点の抽出を行い、徐々に圧力を加えたときの

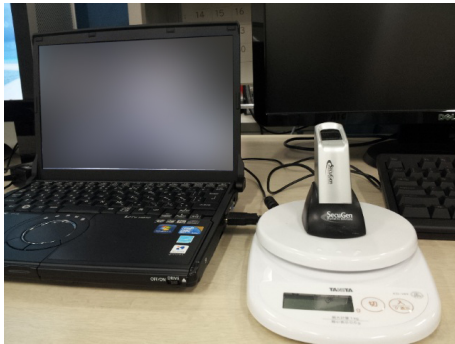


図 5 実験方法の様子.



図 6 実験風景

画像の前後に対応する特徴点の座標 (x, y) の集合を求めた. 特徴点の座標の集合は, 18 個の対応する特徴点の座標の小集合の集まりとして抽出された. Optical Flow は, 連続かつ時系列的な画像変化を解析するアルゴリズム (論文 [8]) である.

3.4 特徴点の集合の選定

(x_j^k, y_j^k) は k 番目の特徴点の j 枚目の取得画像 $(60 + 20(j - 1) g)$ の加重) での座標を表し, 特徴点の集合を

$$S_k = \{(x_1^k, y_1^k), (x_2^k, y_2^k), \dots, (x_{18}^k, y_{18}^k)\}$$

と書く. 特徴点の全体は

$$U = S_1 \cup S_2 \cup S_3 \dots S_n$$

で表す.

この際, 加重を少しずつ変えて採取した特徴点の変位 $\{R_k\} (k = 1 \dots n)$:

$$R_k = \{ \|(x_{j-1}^k, y_{j-1}^k) - (x_j^k, y_j^k)\| \mid 1 \leq k \leq n, 2 \leq j \leq 18 \}$$

は図 7 のヒストグラムに示すように多くが小さな値に納まっている. 加重が近いにも関わらず変位 $(\max[R_k])$ が 2 を越える特徴点 S_k は, Optical Flow による特徴点追跡に失敗したと見なして U から除いた.

次に, 新たにできた特徴点の座標の小集合内で次に対応する特徴点との差分を取った. 特徴点の移動距離の集合 R を重複を許す多重集合として以下のように定義する :

$$R = \{ \|(x_{j-1}^k, y_{j-1}^k) - (x_j^k, y_j^k)\| \mid 1 \leq k \leq n, 2 \leq j \leq 18 \}$$

実験で得られた R の要素のヒストグラムを 図 11 に示す. 図 7 のヒストグラムから R の要素が 2 付近で分布に大きく開きがあることがわかる. そこで, さらに, 集合 S_x の中から R が 2 以上出た場合において, 集合 S_x を集合 U から取り除いた. この操作によって, 対応する特徴点が本来存在しない部分に出現しているものを取り除いた. 分布に差が開いた原因としては, 指紋画像が白黒の縞模様であるため, 本来異なる領域が同じような特徴を示すことがあり, Optical Flow が特徴点をうまく追跡できなかったためである.

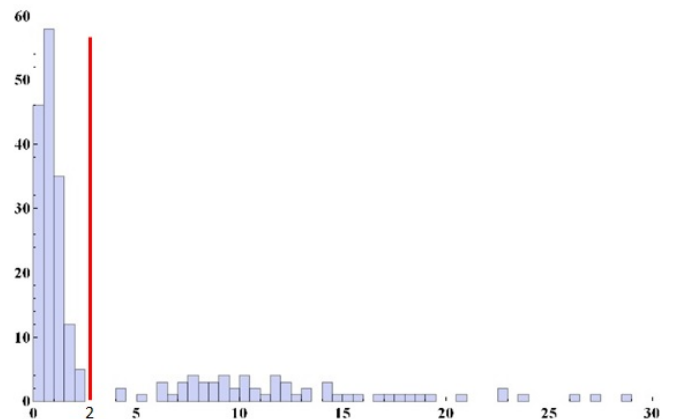


図 7 特徴点集合の差分の分布.

3.5 対応する特徴点の補正

3.4 によって新たにできた集合 U をプロットしたものを 図 8 に示す. また, 論文 [1] を参考に特徴点の分布をほとんど含めないように 図 8 に楕円を描いた. そして, 楕円の領域内を a の領域, 楕円の外側の領域を c の領域と定義する. a の領域は, 特徴点がほぼ存在していないことから, 加重変化による指腹部の歪みがほとんどみられないということが観察された. そして, 楕円の外側の領域は, 外側に広がっていくような動きをみせていることが観察された. また, このように 2 つに分けられる領域とは別に, 図 8 の枠内で局所的な歪みがみられた. このような外側に広がっていくような動きと別の動きをとっているものを局所的な歪みと定義する. 論文 [1] によると c の領域にある (x, y) 座標は, 最適なアフィン変換によって補正することができると述べられている. そこで加重開始の 60g のときと加重終了時の 400g のときで対応する特徴点の中でも, c の領域にある特徴点を用いて次の実験をした. まず, c の領域にある (x, y) 座標を最適なアフィンによって片方の特徴点に補正した. c の領域にある (x, y) 座標群を $P_i^w = (x_1, y_1, \dots, x_i, y_i)$, 最適

なアフィン変換をする行列を A と定義する.

$$\begin{cases} P_i^0 : \text{加重 } 60\text{g のときの } c \text{ の領域にある } (x, y) \text{ 座標群,} \\ P_i^{400} : \text{加重 } 400\text{g のときの } c \text{ の領域にある } (x, y) \text{ 座標群,} \end{cases} \quad (2)$$

P_i^0 から P_i^{400} への補正するアフィン変換行列を求め, 実際の特徴点と比較して誤差の分布を求めた.

$$AP_i^0 - P_i^{400} \quad (3)$$

$$\frac{1}{n} \sum_i |AP_i^0 - P_i^{400}|^2 \quad (4)$$

複数のサンプルについて上の誤差分布を求めた結果の典型的な分布を図 9 と図 10 に示す.

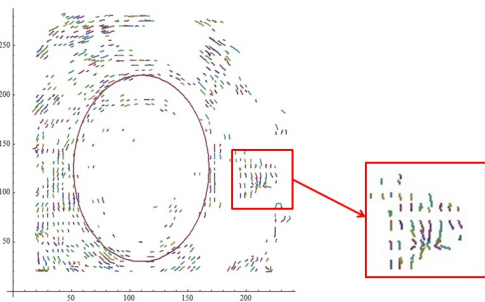


図 8 1 セットによる特徴点の分布と歪んだ部分の拡大図.

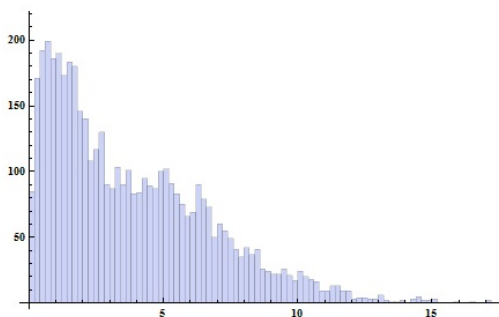


図 9 アフィン変換による誤差の分布図 1.

4. 考察

指腹部を垂直に圧力をかけると, 図 8 のように中心からほぼ楕円に近い形で変化しない領域が現れる. またその中心領域の外側は, 中心領域を固定しながら流動的に広がっていくことが観察される. 中心領域を固定しながら外側の領域が広がっていく原因として, 指腹部の形状と柔らかさ

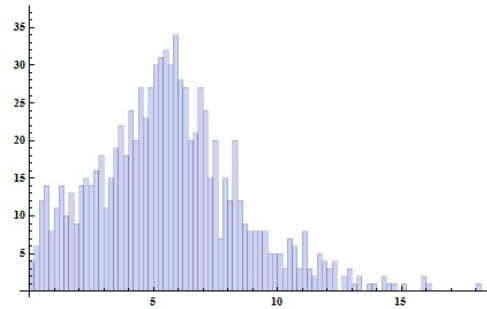


図 10 アフィン変換による誤差の分布図 2.

が考えられる. 指の腹部の形状は, 柔らかく, 弧を描くように中心部分が盛り上がった形をしている. 今回の実験のように垂直に接触式指紋センサーに指をあてる際には, 中心部分が一番最初に接触するため中心領域の領域が強く接触面と密着し変化しない領域が現れる. さらに圧力を掛けることで Cappelli ら [1] の指摘通り, 外側への応力により外周部の静摩擦が壊れて, 中心領域と周辺の領域が Affine 変形する 2 つの領域が表れたと考えられる.

しかし, 図 8 にも現れているように, 一般には静摩擦が残る領域 (Cappelli ら領域 a) は複数存在しており, Affine 変形する領域は領域 a と同心の楕円形状にならないことが図 10 の誤差分布からも確認できる

5. まとめ

本論文では, 垂直な方向の圧力をかけた指紋形状の変化を実験により測定し, Cappelli らの論文 [1] の妥当性を検証した. 結論として, 接触式指紋センサーに垂直方向に圧力をかけることによって, Cappelli らの論文 [1] の指摘通り, 中心からほぼ楕円に近い形で変化しない領域を形成し, その中心領域の周辺の領域は, 流動的に広がっている部分と局所的に歪んでる部分が観察される. しかし, 論文 [1] が例示している同心楕円で領域を分け, アフィン変換によって補正する方法では, 不十分な場合があることが実験により確認された. より現実的な指紋の弾性モデルを提案することが今後の課題である.

謝辞

本研究は, JSPS 科研費 (基盤研究 (A)25240017) の助成を受けたものです.

参考文献

- [1] R. Cappelli, D. Maio, D. Maltoni, "Modelling plastic distortion in fingerprint images," in: Proceedings of ICAPR2001, Second International Conference on Advances in Pattern Recognition, Rio de Janeiro, 2001.
- [2] Asker M. Bazen*, Sabih H. Gerez, "Fingerprint match-

- ing by thin-plate spline modelling of elastic deformations”
- [3] F. Bookstein, “Principal warps: Thin-plate splines and the decomposition of deformations, ”IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 11 (6) (1989) 567-585.
 - [4] X. Jiang, W. Yau, “Fingerprint minutiae matching based on the local and global structures, ”in: Proceedings of ICPR2000, 15th International Conference on Pattern Recognition, Vol. 2, Barcelona, Spain, 2000, pp. 1042-1045.
 - [5] 前野, 小林, 山崎, “ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係, ” 機論 63-607, C(1997), 881-888.
 - [6] “平成 22 年度 成果報告書戦略的国際標準化/推進事業標準化先導/研究バイオメトリクス認証におけるテンプレート保護技術に関する標準化, ”2011, 44-59
 - [7] R. Cappelli, “Synthetic Fingerprint generation, ”in D. Maltoni, D. Maio, A.K. Jain and S. Prabhakar, Handbook of Fingerprint Recognition (Second Edition), Springer, 2009
 - [8] Horn, Berthold K., and Brian G. Schunck. “Determining optical flow.”1981 Technical Symposium East. International Society for Optics and Photonics, 1981.