

時間サンプリングに依存しない時空間不変量の計算法

溝 口 睦[†] 佐 藤 淳[†]

視点位置によらずに対象物を認識するには幾何学的不変量が非常に有用である。従来の不変量は形状などの空間的な特徴に関するものであったが、対象物を認識するうえでは、その対象物が持つ運動も非常に重要な情報である。そこで我々は、空間中でのみ考えられていた従来の不変量を、時間軸も入れた時空間に拡張した時空間不変量を提案し、視点によらない動作認識が可能であることをこれまでに示した。しかし、時空間不変量では時間軸という新たな座標軸を入れたことから、時間軸方向のサンプリングがつねに等しくなければならないという問題があった。そこで本稿では、時空間中に tri-tangent という概念を導入することにより、時間サンプリングに依存しない時空間不変量の計算法を提案する。また実験によりジェスチャなどの運動が、視点によらず、また時間サンプリングにもよらず認識可能であることを示す。

Computing Space-time Invariants from Unsynchronized Image Sequences

MAKOTO MIZOGUCHI[†] and JUN SATO[†]

Geometric invariants are very useful for recognizing objects in the scene from arbitrary viewpoints. The existing invariants are defined by the spatial configurations of image features. However, motion patterns of objects are also very important cue for recognizing objects in the scene. Thus, we recently proposed the space-time invariants which extend the existing invariants defined in the space, and showed that they enable us to recognize motions of objects from arbitrary viewpoints. However, since the space-time invariants are defined both in the space and the time, they require the synchronization of image sampling in the time domain. Thus, in this research, we propose a method for computing space-time invariants from sequential images taken by arbitrary time sampling. To do this, we introduce the concept of tri-tangent in the space-time. Moreover, we apply the proposed space-time invariants for gesture recognition, and show that they enable us to recognize gestures reliably from arbitrary viewpoints.

1. はじめに

我々の生活の中では、物体の運動の情報が非常に重要な役割を持つことが多い。人間はあるシーンを理解するとき、シーン中に存在する物体からだけでなくシーン中の物体の動きからもその場を表す重要な情報を得ている。たとえば、手話やジェスチャには1つ1つの動作にそれぞれ意味が含まれている。また、単に人間が歩くという動作にもそこにはその人個人が持つ歩き方の特徴や癖といった情報が含まれている。このような情報は個人を識別する際に重要な役割を果たす。またこのような動きの持つ情報を利用することで、テレビやビデオ、インターネットから得られる動画像情報を検索システムへ応用しある特定の動作のシーンを

抜き出すことができる。

従来の研究より、カメラから得られた映像を用いたジェスチャ認識や、物体の動きからシーンの内容を読み取ることが可能であることが示された^{1),2)}。しかし、これらの動作認識は画像内の注目する対象の特徴量をもとに運動の識別を行っているため、カメラの視点や内部パラメータが変化すると一般にまったく異なる値となるため応用が難しい。通常3次元空間中の運動はカメラから画像上に投影したものが扱うが、このとき視点やカメラの内部パラメータが限定されると非常に大きな制約を受けたことになる。つまり、3次元空間中の対象物が自由な視点から得られる場合も認識できることが求められる。

近年、視点位置によらずに対象物を認識する方法として、幾何学的不変量を用いる方法が注目されている。これまでは物体の形状や表面パターンなど静的な特徴に関する不変量についての報告がなされてい

[†] 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

る^{3)~6)}。しかし、これらの不変量はジェスチャなどの動きを認識するために用いることはできなかった。そこで、対象物の運動を識別するために従来の空間的な特徴に関するものであった不変量を、時間軸を加えた時空間に拡張した時空間不変量が提案された⁷⁾。これにより、対象物が持つ動的な特徴である動作や運動などを視点位置によらずに識別することが可能となった。しかし、この時空間不変量は時間軸という新しい座標軸を入れたために、画像の取得のサンプリング間隔が等しくなければならないという問題があった。

そこで、本稿では時空間中に tri-tangent という概念を導入することにより、時間サンプリングに依存しない時空間不変量の計算方法を提案する。ここで、時間サンプリングに依存しないとは、計測開始時刻のずれと画像の取得のサンプリング間隔に依存しないことを意味する。また、サンプリング間隔に依存しないことから、速度のみが異なる運動も同一の運動と見なす。このような時空間不変量を用いることによって、カメラ画像だけでなく過去に撮られたビデオデータや映画、その他サンプリング間隔が分からないような連続画像からも、対象物の運動を視点によらずに識別することができる。

以下では、実際の運動が平面運動であり、かつこれが弱透視投影によって投影されていると仮定する。まず、最近提案された時空間不変量における問題について考え、その問題を解決するために導入した tri-tangent の性質と tri-tangent の接点の計算方法について述べる。次に、tri-tangent の接点を用いて、運動の軌跡を表す時空間曲線を正規化する方法を述べる。そして、このような時空間曲線から運動を識別する方法について述べる。最後に、実際に連続画像を用いて対象物が持つ運動が視点や時間サンプリングによらずに識別可能であることを示す。

2. 時空間不変量と時間サンプリング

図 1 (a1) は人物がある運動をしているときの連続画像の一部である。この運動をトラッキングし、2次元画像に時間軸を加えた3次元の時空間においてその軌跡を表したものを図 1 (a2) に示す。一方、同じ運動を別の視点のカメラから観測した結果が図 1 (b1) および (b2) である。このようにして得られる投影された時空間における軌跡から人物の動作を識別したい。しかし図 1 (a2) と (b2) に示すように、連続画像がなす時空間における軌跡はカメラと人物の相対的な位置関係によってまったく違ったものとして観測される。そこで、位置や姿勢やカメラの内部パラメータによらず

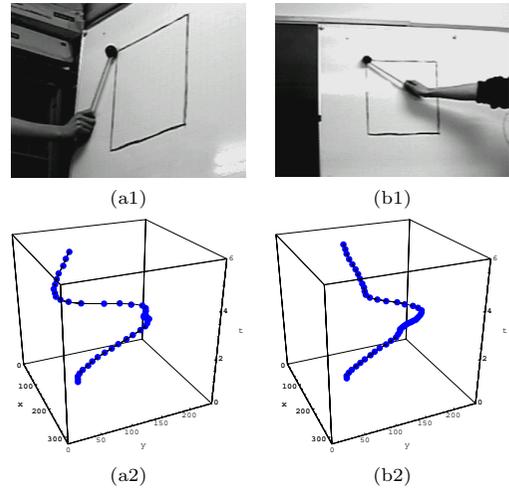


図 1 時空間における軌跡
Fig. 1 Loci in space-time.

同じ動作であれば同じ値をとる時空間不変量をもとに運動の認識を行う方法を検討する。まず、実際の空間がなす時空間から画像がなす時空間への投影について説明する。

2.1 時空間不変量

3次元空間中の平面 Π 上の点 $X = [X, Y]^T$ から 2次元画像 π 上の点 $x = [x, y]^T$ への投影は平面射影変換である。したがって、投影の前後で変わらず保持される射影不変量が存在する。よって、射影変換によって投影された画像どうしであれば、たとえ異なる視点から投影されたものであっても射影不変量を用いて物体認識などが行える。

しかし、本稿で扱う対象は形状ではなく運動である。そこで対象空間を平面とし、この平面 Π と時間 Σ よりなる時空間を考える。平面 Π 上の点 $X = [X, Y]^T$ の運動は 3次元時空間 $\Pi \times \Sigma$ における点 $W = [X, Y, t]^T$ の軌跡と考えることができる。ここで時空間 $\Pi \times \Sigma$ を投影してできる画像がなす時空間 $\pi \times \sigma$ を考える。平面 Π 上の点 $X = [X, Y]^T$ の運動は時空間 $\pi \times \sigma$ 中では点 $w = [x, y, t]^T$ の軌跡として観測される。つまり、 $\Pi \times \Sigma$ から $\pi \times \sigma$ への時空間投影は、空間 Π に対する 2次元の射影変換と時間 Σ に対する 1次元の恒等変換よりなる 3次元の異方性投影である。

このような異方性投影のもとでは一般に不変量は存在しない。しかし、空間軸の投影に弱透視投影が仮定できるとき時空間投影はアフィン変換となることが最近の研究で明らかになった⁷⁾。一般にアフィン変換のもとではアフィン不変量が存在することが分かっている。したがって、このような場合はアフィン不変量と

して時空間不変量が定義できる．すなわち，時空間という拡張された空間において不変量を考えることにより，これまで形状などの静的な特徴の認識に限定されていた不変量を，運動や行動などの動的な特徴の認識に拡張して応用することが可能となった．

2.2 時間サンプリングに依存しない時空間不変量の計算

以上に述べたように，図 1 (a2) および (b2) に示すような 3 次元時空間から正しく対応する特徴点が得られるとき，アフィン不変量として定義された時空間不変量が一致する．しかし，時間という新たな次元を加えたことにより，不変量計算のための特徴点を取得するときに，時間軸方向のサンプリングの同期を保つことが新たに必要となった．たとえば，第 1 の視点では 1 秒間隔でサンプリングし第 2 の視点では 2 秒間隔でサンプリングした場合は，同一の運動を観測したにもかかわらず，これら 2 つの視点で計算した時空間不変量の値は一致しない．このことから分かるように，一般に時間軸のサンプリング間隔が異なる場合には従来の時空間不変量を用いて運動の一致を比較することは難しい．

そこで本稿では，時空間の軌跡に対し tri-tangent という性質を用いることにより，時間サンプリングに依存しない特徴点を抽出し時空間不変量を計算する方法を提案する．

一般に不変量は，単一の量でもよいし複数の量の集合であってもかまわない．本稿では複数の量の集合，すなわち曲線として時空間不変量を考えることにする．特に，tri-tangent を用いて時空間軌跡の正規化を行い，正規化された曲線として時空間不変量を定義する．

3. tri-tangent

今，時空間における点の軌跡を時空間曲線として考える．このような時空間曲線は時空間中の点列に対して 3 次元 B スプライン曲線などの自由曲線をフィッティングすることにより得られる．曲線から不変量を求める場合の大きな問題点は，多角形や多面体のような明確な特徴点が存在しないことである．そこで本研究では，tri-tangent という概念を用いて射影変換のもとで不変な特徴点を導き出すことを考える．

3.1 tri-tangent とその射影不変性

2 次元平面上に曲線があるとき，この曲線に 2 点で同時に接する直線を bi-tangent と呼ぶ．この bi-tangent の接点は平面射影変換によって変化しない特徴点であることが知られている^{5),8)}．本節では，これを 3 次元空間における空間曲線に拡張した tri-tangent につい

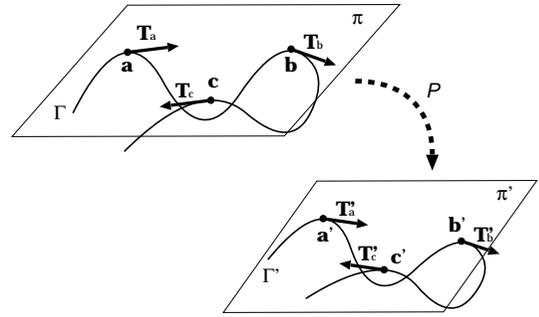


図 2 トリタンジェント
Fig. 2 Tri-tangent.

て考える．

3 次元空間において同一直線上にない 3 点を通る平面はただ 1 つ存在する．今，3 次元空間中に空間曲線 Γ が存在するとすると，図 2 に示すようにこの空間曲線 Γ に 3 点で接する平面 π を定義することができる．このような空間曲線に 3 点で接する平面を tri-tangent と呼ぶ．

ここで，tri-tangent の接点が射影変換のもとで不変な特徴点であることを示す．図 2 に示すように，空間曲線 Γ 上の 3 点 a, b, c で接する平面を π とし，曲線 Γ が射影変換 P により曲線 Γ' へと変換されると考える．このとき， Γ 上の 3 点 a, b, c はそれぞれ Γ' 上の a', b', c' に変換されるとする．すると， a, b, c の 3 点を通る平面 π はこの射影変換 P により a', b', c' の 3 点を通る平面 π' へと変換される．ここで問題となるのは，変換後の平面 π' が果たして曲線 Γ' に対して tri-tangent となるか否かである．以下ではこの性質が成り立つことを示す．

Γ 上の 3 点 a, b, c における接ベクトルをそれぞれ T_a, T_b, T_c とすると， T_a は平面 π 上のベクトルである．射影変換においては，平面上の直線は必ず対応する平面上の直線へと変換されるので，接ベクトル T_a は射影変換 P により点 a' を通る平面 π' 上のベクトル T'_a へと変換される．射影変換では点は点に投影されるため，無限遠の点が有限な点に，また有限な点が無限遠の点に変換されるような特異な場合を除けば，無限に近い 2 点は無限に近い 2 点に投影される．したがって，曲線上において無限に近い 2 点を結ぶ直線である接ベクトルは射影変換後も曲線上の接ベクトルとなる．よって， T'_a は曲線 Γ' の接ベクトルであり，かつ平面 π' 上に存在することが分かる．点 b, c における T_b, T_c についても同様であるので， a', b', c' におけるそれぞれの接ベクトル T'_a, T'_b, T'_c が平面 π' 上に存在する．したがって， π' は

曲線 Γ' に 3 点 a', b', c' で接する接平面であるといえる。すなわち、曲線上の 3 点 a, b, c がなす平面が tri-tangent であるとき、これを射影変換した曲線上の 3 点 a', b', c' がなす平面も tri-tangent となる。したがって、tri-tangent の接点は射影変換によって変化しない仮想的な特徴点と考えることができる。

3.2 tri-tangent の計算方法

今、空間曲線 Γ 上の 3 点を a, b, c とし、各点における接ベクトルを T_a, T_b, T_c とする。曲線上の点 a, b, c を通る平面 π がこの曲線の tri-tangent となるためには、すなわちこの曲線の接平面となるためには、点 a, b, c における接ベクトル T_a, T_b, T_c が点 a, b, c を通る平面上に存在すればよい。したがって、点 a, b, c を通る平面 π の法線ベクトルを n とすると、この法線ベクトル n と各点における接ベクトル T_a, T_b, T_c の内積が 0 であればよいので式 (1)~(3) を同時に満たせばよい。

$$n \cdot T_a = 0 \tag{1}$$

$$n \cdot T_b = 0 \tag{2}$$

$$n \cdot T_c = 0 \tag{3}$$

ここで、 n は $n = (a - c) \times (b - c)$ などとして求まる。また、3 点は同一直線上にあってはならないので式 (4) を満たすことも必要である。

$$(a - b) \cdot (a - c) \neq 0 \tag{4}$$

しかし、これらの条件を満たす点 a, b, c を Γ 上で探索するのは非常に時間がかかる。そこで、ピラミッド法により高速に tri-tangent を見つける方法を次に述べる。この方法では、まず粗く tri-tangent の存在しそうな 3 点の組合せを見つけておき、その近傍を序々に細かく探索していく。これにより、最終的に精度の良い tri-tangent を高速に発見するというものである。

図 3 に示すように、まず空間曲線上の点を一定区間ごとに選ぶ。そして、これらの点から 3 点を選ぶすべての組合せについて式 (1)~(3) の $n \cdot T_a, n \cdot T_b, n \cdot T_c$ を計算する。ある閾値より小さいものの中か

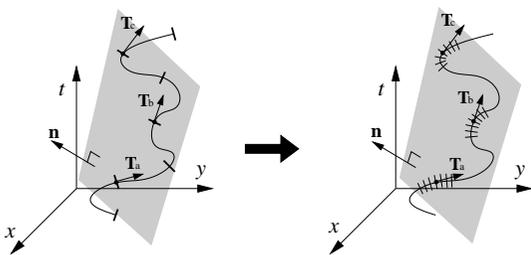


図 3 tri-tangent の探索法
Fig. 3 The method for finding tri-tangent.

ら極小値を求め、その極小値の近傍をさらに小さい区間に分割する。このような区間の分割と極小値の計算を繰り返すことによって tri-tangent の精度を上げていく。最終的に、ある閾値より小さくなった時点で繰返しを終了させることによって tri-tangent の接点を求める。閾値については現在のところ経験的に決めている。

4. tri-tangent を用いた時空間不変量の計算

以上より、tri-tangent の接点は射影変換のもとで不変な特徴点となることが分かった。本章では、このような tri-tangent の接点として得られる特徴点を用いて時空間曲線を正規化する方法、すなわち時空間不変量を計算する方法について述べる。

4.1 時空間曲線の正規化

時空間不変量の計算、すなわち時空間曲線の正規化は、図 4 に示すように、tri-tangent により得られた特徴点どうしが一致するよう、ある時空間曲線を基準となる時空間曲線に変換することにより行う。

文献 7) に示すとおり、同一運動を異なる視点で観測した場合、これらの視点より得られる時空間曲線上の点どうしの間には以下の関係がある。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ t' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & 0 & c \\ d & e & 0 & f \\ 0 & 0 & g & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ t \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

式 (5) より、対応する時空間曲線どうしの変換 H_a は 8 自由度の変換であることが分かる。このような 8 自由度の変換 H_a が求めれば、基準となる時空間曲線への正規化が可能となる。

今、それぞれの時空間曲線上において tri-tangent の接点として 3 点の特徴点 $w_i = [x_i, y_i, t_i]^T$ 、 $w'_i = [x'_i, y'_i, t'_i]^T$ ($i = 1, \dots, 3$) が得られたとすると、式 (5) を展開し整理しなおすことにより、以下に

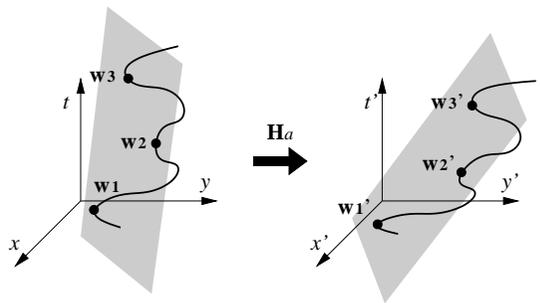


図 4 時空間曲線の正規化
Fig. 4 Normalization of space-time curves.

示すように a, \dots, h に関する線形方程式が得られる．

$$MA = \mathbf{0} \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{0}$ はゼロベクトルを表し、 M, A はそれぞれ次に示す行列とベクトルである．

$$M = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x'_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & -y'_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_1 & 1 & -t'_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x'_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & -y'_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_2 & 1 & -t'_2 \\ x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x'_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & -y'_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_3 & 1 & -t'_3 \end{bmatrix}$$

$$A = [a \ b \ c \ d \ e \ f \ g \ h \ 1]^T$$

式 (6) では未知数が A の 8 個に対して拘束式が 9 個あるため、最小二乗法により A を求めることができる．よく知られているように、この最小二乗解 A は $M^T M$ の最小固有値に対応する固有ベクトルより求まり、このときの最小固有値は方程式 (6) の残差の二乗和 r に対応する．このようにして得られた A に対する残差 r が十分に小さい場合には選んだ 3 点どうしの対応は正しく、逆に r が大きい場合には対応が間違っていると考えられる．したがって、それぞれの時空間曲線上で検出されたすべての tri-tangent どうしで A と r を求め、 r がある閾値以下である場合に、得られた A に基づき式 (5) により基準となる時空間曲線への正規化を行う．このようにして正規化を行ったのち、次に述べるように時空間曲線の一致度、すなわち時空間不変量の一致度を調べる．

4.2 時空間曲線の一致度計算と動作認識

前節で述べた方法を用いて時空間曲線を正規化することにより、これらの時空間曲線が表す運動が同一か否かを調べることが可能となる．今、2 つの異なる視点において撮影したビデオ映像より時空間曲線 Γ_1 と Γ_2 が得られたとする．それぞれの時空間曲線上で得られた tri-tangent をもとに前節で述べた方法により Γ_2 を変換し Γ'_2 が得られたとする．もしも 2 つの時空間曲線 Γ_1, Γ_2 が、もともと同じ動きを撮影して得られたものであれば、 Γ_1 と Γ'_2 は完全に一致し、もともと異なる動きであれば Γ_1 と Γ'_2 は一致しない．

しかし、実際には時空間曲線のフィッティング誤差、画像ノイズや正規化の際に用いる 3 点の基底点の精度などにより、たとえ同じ運動を撮影した場合でも Γ_1 と Γ'_2 は完全に一致しない．そこで図 5 に示すように、各時刻においてこれら 2 つの曲線間の距離を計算し、この距離が閾値以下の部分を抽出することに

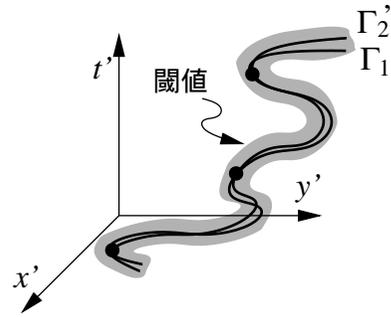


図 5 時空間曲線どうしの比較
Fig. 5 Comparison of space-time curves.

より、同一の動きを持つ部分を検出する．また、このときの曲線間の距離は画像における軌跡の距離に対応している．

5. 運動の同一性と不変量

不変量を用いて物体認識や動作認識を行う場合には、視点に依存しないという大きな利点がある反面、不変量が一致することと人間が同一だと感じる感覚は必ずしも一致しないという問題が存在する．一般に我々人間は形状が等しいということユークリッド変換における不変量として考えている．これに対し、アフィン不変量や射影不変量を用いる場合には、アフィン変換や射影変換における同一性を考えることになる．ユークリッド変換はアフィン変換、射影変換の部分群であるため、ユークリッド的に等しいものはアフィンの、射影的に等しいが、その逆は成り立たない．したがって、アフィン不変量や射影不変量を用いる場合には、人間が感じる同一性とアフィンの、あるいは射影的な同一性との間の違いに注意して利用する必要がある．

今回提案した時間サンプリングに依存しない時空間不変量では、時間軸の変化がアフィン変換で表せる運動は同一運動と判断する．つまり、運動の計測開始時刻や画像のサンプリング間隔がたとえ異なっても同一運動であると判断する．一般に人間は、同一運動が時間的に均一に伸びたり縮んだりした場合には、これらを単に速度の異なる同一の運動であると感じていると思われる．すなわち、時間軸方向にアフィ的な変化があっても速度が異なるのみで運動が異なるとは知覚されないと考えられる．これに対し、時間軸において不均一な変化すなわちアフィン変換で表せないような変化が発生すると、人間はこれを異なる運動と感じる場合が多い．したがって、時間軸の変化がアフィン変換で表せる運動を同一運動であると判断する本時空間不変量は人間の感覚に比較的良好に合うものである

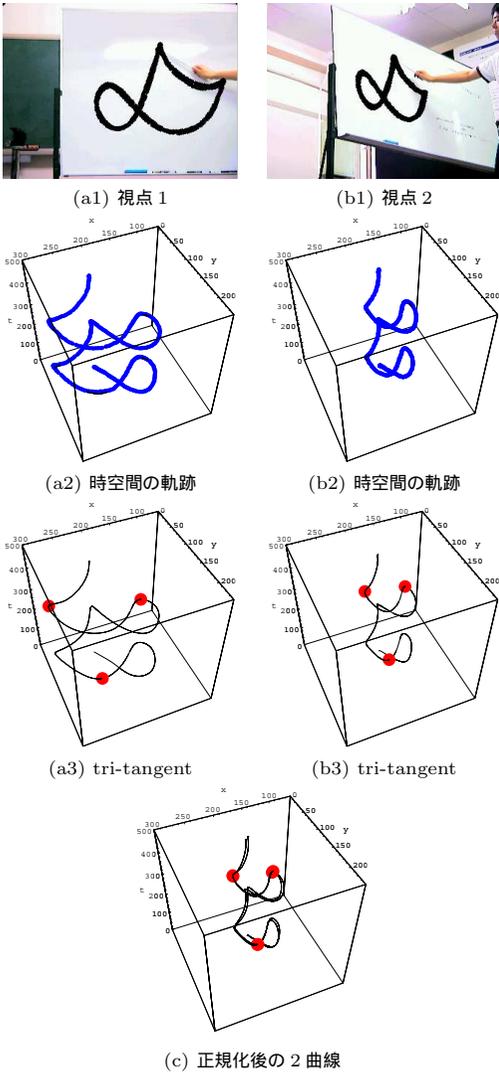


図6 時空間不変量の計測結果(3拍子)

Fig. 6 The space-time invariants computed from human motions (triple time).

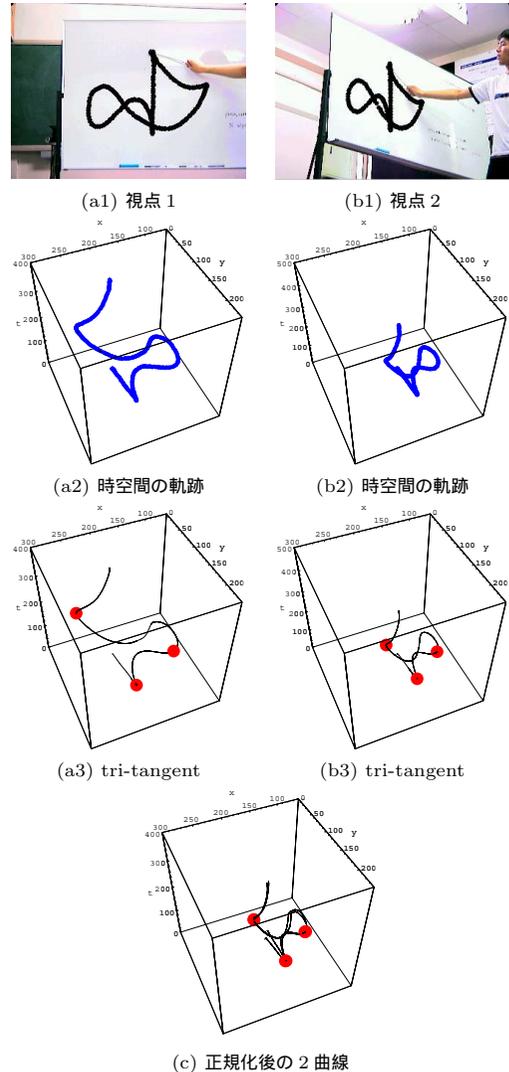


図7 時空間不変量の計測結果(4拍子)

Fig. 7 The space-time invariants computed from human motions (quadruple time).

といえる。

6. 実験

次に、時空間不変量を用いて動作認識を行った実験結果を示す。

視点も時間サンプリングも異なる条件下で、実際の対象物の運動をカメラに投影して得られた画像から時空間不変量をもとに運動の識別を行った結果を示す。

図6(a1)および(b1)は、3拍子の運動を2つの異なる視点において観測している様子である。指揮棒の先端を相関トラッカーによりトラッキングし画像中の運動軌跡を求めた。それぞれの視点における連続画像が

ら時空間における運動の軌跡を求めた結果を図6(a2)および(b2)に示す。図中の点が画像サンプリングで得られた点であり、視点1では476点、視点2では495点であった。したがって、これらの2つの視点において画像サンプリングは同期していない。これらの点に対しBスプライン曲線をフィッティングし tri-tangent を求めた結果を図6(a3)および(b3)示す。図中の曲線はフィッティングによって得られた時空間曲線であり、点は tri-tangent の3つの接点を表す。図6(b3)に示す3点を基準として、図6(a3)に示す時空間曲線を正規化した結果が図6(c)である。正規化を行いアフィンの歪みを取り除いたために2曲線がほぼ一致

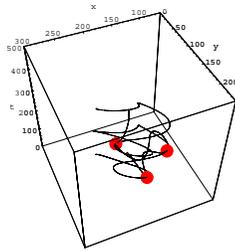


図 8 3 拍子と 4 拍子の比較

Fig. 8 The space-time invariants of triple time and quadruple time.

表 1 正規化後の時空間曲線の一致度

Table 1 Difference in space-time curves after normalization.

視点の異なる 3 拍子	9.671396
視点の異なる 4 拍子	7.676959
3 拍子と 4 拍子	40.173174

していることが確認できる。このように、たとえ視点や時間サンプリングが異なっても、提案法により運動の同一性が判断可能であることが分かる。

図 7(a1) および (b1) は 4 拍子の場合の例である。画像サンプリングで得られた点は、視点 1 では 368 点、視点 2 では 257 点であった。先と同様に、時空間曲線を求めて tri-tangent を抽出し、曲線を正規化した結果を図 7(c) に示す。4 拍子の運動においても 3 拍子のときと同様に、提案法により視点や時間サンプリングによらず運動の同一性が判断できることが分かる。また、図 8 は 3 拍子の視点 1 の軌跡と 4 拍子の視点 2 の軌跡の間で正規化を行った例であるが、図より明らかのように、これら 2 つの運動では正規化を行っても時空間曲線は大きく異なっており、2 つの運動が識別可能であることが分かる。

表 1 は各実験において計算した時空間曲線の一致度を示したものである。表から分かるとおり、たとえ視点が異なっても同じ運動であれば一致度の値は小さく、それに対し 3 拍子と 4 拍子のように運動が異なる場合には一致度の値が大きくなることから、2 つの運動の同一性を判断できることが分かる。

7. ま と め

本稿では、時空間中に tri-tangent という概念を導入することにより、時間サンプリングに依存しない時空間不変量の計算法を提案した。

まず、空間曲線に 3 重に接する tri-tangent の概念を導入し、tri-tangent の接点が射影的に不変な特徴点となることを示した。次に、時空間中の点に B スプライン曲線をフィッティングし、この時空間曲線から

tri-tangent の性質を用いて特徴点を導き出した。そして、求めた特徴点をもとに時空間曲線を正規化することによって、位置や姿勢、時間サンプリングが異なることによって起こるアフィンの歪みを取り除く方法を示した。さらに、正規化した時空間曲線の一致度をみることにより、運動が同一かどうかを判別する方法を提案した。

実験により、視点や時間サンプリングが異なっても、tri-tangent を用いて正規化することにより運動の認識ができることを確認した。

tri-tangent は純粋な円運動のような単純な運動の場合には存在しないが、人間のジェスチャなど一般の動作では、このような特異な運動となるのは非常にまれであるため、tri-tangent による正規化は多くの場合有効な方法であると考えられる。

本稿では、平面運動を扱ったが、一般の 3 次元空間中の運動への拡張が今後の課題である。

謝辞 日頃ご指導いただいている名古屋工業大学佐藤幸男教授に感謝いたします。なお本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(奨励研究 A-11780263)を受けて行った。

参 考 文 献

- 1) Bobick, A.F. and Wilson, A.D.: A State-Based Technique for the Summarization and Recognition of Gesture, *Proc. 5th International Conference on Computer Vision*, Cambridge, USA, pp.382-388 (1995).
- 2) Darrell, T. and Pentland, A.: Space-Time Gestures, *Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, New York, pp.335-340 (1993).
- 3) 杉本晃宏: 幾何学的不変量とその応用, コンピュータビジョン—技術評論と将来展望, 松山隆司, 久野義徳, 井宮 淳(編), pp.97-122, 新技術コミュニケーションズ (1998).
- 4) Mundy, J.L. and Zisserman, A.: *Geometric Invariance in Computer Vision*, MIT Press, Cambridge, USA (1992).
- 5) Zisserman, A., Forsyth, D., Mundy, J., Rothwell, C., Liu, J. and Pillow, N.: 3D Object Recognition using Invariance, *Artificial Intelligence*, Vol.78, pp.239-288 (1995).
- 6) 佐藤 淳: コンピュータビジョン—視覚の幾何学. コロナ社 (1999).
- 7) 佐藤 淳: 時空間不変量と視点によらない動作認識, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-II, No.8, pp.1790-1799 (2001).
- 8) Sato, J. and Cipolla, R.: Affine Reconstruction of Curved Surfaces from Uncalibrated View

of Apparent Contours, *Proc. 6th International Conference on Computer Vision*, Bombay, India, pp.715-720 (Jan. 1998).

(平成 14 年 3 月 1 日受付)

(平成 14 年 9 月 12 日採録)

(担当編集委員 向川 康博)



溝口 睦

平成 13 年名古屋工業大学電気情報工学科卒業。現在同大学大学院博士前期課程在学中。コンピュータビジョンの研究に従事。



佐藤 淳(正会員)

昭和 59 年名古屋工業大学工学部卒業。平成 8 年ケンブリッジ大学大学院博士課程修了。同年ケンブリッジ大学工学部助手。平成 10 年名古屋工業大学工学部助教授。この間に、

ART 人間情報通信研究所客員研究員等。コンピュータビジョン、幾何学的不変量、視覚誘導、視覚ユーザインタフェースの研究に従事。博士(Ph.D.)。著書に「コンピュータビジョン—視覚の幾何学」(コロナ社)等。BMVC'94 最優秀科学論文賞, BMVC'97 最優秀科学論文賞, 第 5 回画像センシングシンポジウム論文賞等各受賞。