

# 成層圏プラットフォームを想定した車両の動体追跡手法に関する研究

## A New Technique for Vehicle Tracking on the Assumption of Stratospheric Platform

清水英範\*・四童子隆\*・布施孝志\*

Eihan SHIMIZU, Takashi SHIDOJI and Takashi FUSE

**Abstract:** High resolution and continuous images at the same point can be acquired by stratospheric platforms. The stratospheric platform has great potential with wider scope of utilization. For instance, the stratospheric platforms may provide measurement of traffic flow. In this study, we argue the possibility of vehicle tracking by stratospheric platforms, to be specific, we estimate displacement vectors of vehicles by applying the probabilistic relaxation method to time-series images. We improve the probabilistic relaxation method by (1) using the color information of vehicles, and (2) using the labeling of each other. The proposed method can be applied to appearance and disappearance of vehicles. Through the application to simulation data and sample image, we confirm the effectiveness of the proposed method.

### 1. はじめに

現在の交通流計測はおもに、道路上に設置された感知器による速度、交通量観測が主流となっているが、観測点を通過する車両の速度および台数を計測することによって観測を行うために、車両個別の挙動を把握するという点で限界がある。このため、交通工学的な要請から、低高度の気球に設置したビデオカメラ等による面的な観測に関する研究<sup>1)</sup>も一部に見ることができるが、その対象範囲が狭いことや高コストなどによって大きな制限を受けている。

ところで、近年、地上 20km 程度の気象の安定した成層圏に飛行船を静止させ、これを移動・高速通信の基地とすると同時に、地上に対する観測を行うという成層圏プラットフォーム構想が、科学技術庁・郵政省により提唱され、その実現が期待されている。この構想が実現すれば、人工衛星画像よりもはるかに空間分解能の高い画像による、しかもほぼ定点の地上観測が可能となり、従来困難であった車両の追跡も容易となる。その結果、信号制御のための交差点の右左折率や飽和交通流率の計測、車線変更や避走挙動などの追従挙動や車線分布状況の観測などによる交通渋滞現象の解明に向けての調査、あるいは OD 調査など、交通工学的に大きな貢献を期待することができる。

以上の背景のもと、本研究は、成層圏プラットフォーム観測による広域を対象とした交通流計測の実

現可能性を探ることを目的とし、連続的に撮影された高分解能静止画像から車両の移動ベクトルを推定するために、確率的弛緩法の改良による新たな手法を提案するものである。

### 2. 対象とする車両追跡問題

本研究では、有限の撮像間隔における 2 枚の時系列画像上に表現されている車両を対応付けることによる車両の動体追跡問題を考える。この問題は、観測された前後 2 枚の画像から、それぞれにおいて車両を抽出する問題と、抽出された車両の対応関係を決定する問題からなる。なお、成層圏プラットフォームによる地上観測機器の仕様はまだ具体的な検討段階に入っていない。しかし、高度 20km 程度の観測であることを考えれば、20 ~ 50cm 程度の地上分解能が期待され、きわめて高い精度での車両の自動検出が可能であると思われる。そこで本研究では、車両の自動検出は現段階の研究目的からは除外し、車両が検出された後の追跡手法に限定して議論する。

本研究で対象とする抽出された車両の対応関係を決定する問題は、図 1 のように車両が抽出された場

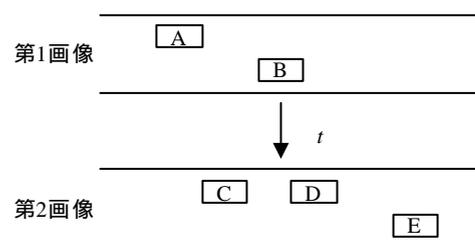


図 1 車両追跡問題

\*東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻  
Department of Civil Engineering, University of Tokyo

合、前後両画像における全ての車両の移動先、あるいは移動元を特定することである。具体的には、第1画像におけるAは、 $t$ 秒後の第2画像においてはC、DまたはEの各車に移動したか、あるいは消失したと考えられる。出現や消失は、駐車場において入庫・出庫があった場合、車両が画像外に出た場合、歩道橋やビルの陰に車両が入ってしまった場合などに生じうると考えられ、この問題を複雑にしている要因の一つとなっている。対象とする問題を整理すれば、それぞれの画像に表現されるすべての車両について、その車両がとりうる状態は、もう一方の画像におけるある車両に対応しているか、あるいは表現されていないかだけとなる。この時、各車両の対応候補は点が車両であるがゆえの物理的要因(最高速度等)によってある程度限定され、また、交通流の局地的均一性や色の類似性を考慮することによって各対応候補への対応確率を定義することができる。このような形で成立しうる組み合わせパターンの中で、最も確からしいものを求めることが本研究の対象とする問題である。

### 3. 確率的弛緩法とその改良

弛緩法(relaxation method)は、局所的な矛盾と解釈の曖昧さを低減する処理を局所並列的に反復することで、より大局的に整合がとれた解釈を得ようとする方法である。このうち、特に各組み合わせの対応可能性を総和1に基準化した数値によって確率的に表現する方法を確率的弛緩法と呼ぶ<sup>2), 3)</sup>。もともとラベル付け(labeling)手法として考えられたこともあり、近年ではステレオマッチング等、画像処理分野への適用が数多くなされている<sup>4), 5)</sup>。本研究では、確率的弛緩法の対応付け基準となる局所的な移動ベクトルの均一性が、車両の移動特性に良く一致することに着目し、車両の対応づけの基礎手法として確率的弛緩法を採用する。具体的には、時刻 $t$ における第1画像および時刻 $t+1$ における第2画像を用い、それぞれの画像中における車両の位置および色が抽出された後、各車両の対応を確率的弛緩法によって求めることを考える。

本研究では、確率的弛緩法を基礎に、車両の追跡手法としてより適したものの改良を行った。手法は、(1)初期ラベル確率設定と(2)ラベル確率更新の2段階からなり、改良した点は以下の通りである。

a) 色情報の利用：初期ラベル確率設定の際に色の類似度を利用する。

b) 双方向法：第1画像から第2画像へのラベル確率と第2画像から第1画像へのラベル確率を区別し、ラベル確率更新の際にそれぞれを考慮する。

従来の順方向のみのアルゴリズムでは、前述したような車両の消失や出現に対応することは難しく、特に第2画像において新たに出現したものについてはその情報を全く利用することができない。双方向のラベルを区別することにより、この問題に対応することが可能となる。

#### (1)初期ラベル確率設定

車両の対応づけを行う上で、非常に有力な情報である色情報を確率的弛緩法の初期ラベル確率設定に利用する。

今後、以下に定義された記号を用いる。

$r_1(x,y), g_1(x,y), b_1(x,y)$ ：第1画像(8bit RGB値)

$r_2(x,y), g_2(x,y), b_2(x,y)$ ：第2画像(8bit RGB値)

ただし、 $0 \leq r, g, b \leq 255 = C_{\max}$  (1)

$D$ ：車両の最大移動可能距離。撮像間隔や道路種別に依存する。

$a_i$ ：画像1から抽出された $(x_i, y_i)$ に位置する車両。ラベル付けの対象。 $i=1, 2, \dots, m$ .

$b_k$ ：画像2から抽出された $(x_k, y_k)$ に位置する車両。 $k=1, 2, \dots, n$ .

：移動ベクトルを意味するラベル。

$=\{1, 2, \dots, n, p\}$  (2)

ただし、「対応車両なし」を表わす $p$ は未定義相違ベクトルの仮想的な $x, y$ 成分に対応する。

$I_k = (\Delta x_k, \Delta y_k),$   
 $-D \leq \Delta x_k \leq D, -D \leq \Delta y_k \leq D \quad (k \neq p)$  (3)

$P_i(k)$ ： $a_i$ がラベル $k$ を持つ確からしさ。ラベル確率と呼ぶ。

$\sum_k P_i(I_k) = 1, 0 \leq P_i(I_k) \leq 1$  (4)

$a_i$ が $L$ 個の対応点候補 $b_{kl} (l=1, 2, \dots, L)$ を持つとき、 $a_i$ は $L+1$ 個のラベルを持つ。この $L+1$ 個の元からなるラベルの部分集合を $L_i$ とする。

$L_i = \{k_{l1}, k_{l2}, \dots, k_{lL}, p\}$  (5)

ただし、

$I_{kl} \in I, I_{kl} = (x_{kl} - x_i, y_{kl} - y_i) = (\Delta x_{kl}, \Delta y_{kl})$  (6)

各ラベルについて，車両の色のRGB空間上における距離の2乗  $C_i(I_k)$  は，

$$C_i(I_k) = (r_1(x_i, y_i) - r_2(x_k, y_k))^2 + (g_1(x_i, y_i) - g_2(x_k, y_k))^2 + (b_1(x_i, y_i) - b_2(x_k, y_k))^2 \quad (7)$$

ただし，対応車両がない場合は，RGB値それぞれの色差の期待値から

$$C_i(I_p) = 3 \cdot \left( \frac{1}{3} C_{\max} \right)^2 \quad (8)$$

とする。ここで，

$$\hat{C}_i(I_{kl}) = \frac{\sum_l^p C_i(I_{kl}) - C_i(I_{kl})}{\sum_l^p C_i(I_{kl})} \quad (9)$$

として，車両の色を考慮した初期ラベル確率を

$$P_i^{(0)}(I_{kl}) = \frac{\hat{C}_i(I_{kl})}{\sum_l^p \hat{C}_i(I_{kl})} \quad (10)$$

と定義する。

同様に，「対応車両なし」の初期ラベル確率は

$$P_i^{(0)}(I_p) = \frac{\hat{C}_i(I_p)}{\sum_l^p \hat{C}_i(I_{kl})} \quad (11)$$

である。

## (2)ラベル確率更新

(1)によって決定された各ラベルの初期確率に対して，局所的な移動ベクトルの均一性という基準を用いた更新を行う。この際，第1画像における車両が第2画像上の車両のいずれに対応するかを考えるという順方向ラベルに加え，第2画像上のすべての車両についても第1画像上のいずれに対応するかという逆方向ラベルを考える。すなわち，逆方向ラベル  $'_k$  の逆ラベル確率  $Q_i(I'_k)$  についても考慮するという双方向確率的弛緩法を提案する。

ここで，新たに以下の記号を定義する。

$'_k$  : 逆移動ベクトルを意味するラベル。

$$'_k = \{ '_1, '_2, \dots, '_m, '_p \} \quad (12)$$

ただし， $'_p$  は未定義相違ベクトルの仮想的な  $x, y$  成分に対応する。

$$\begin{aligned} I'_k &= (\Delta x_k, \Delta y_k), \\ -D \leq \Delta x_k \leq D, \quad -D \leq \Delta y_k \leq D \quad (k \neq p) \end{aligned} \quad (13)$$

$Q_i(I'_k)$  :  $b_i$  がラベル  $'_k$  を持つ確からしさ。逆ラベル確率と呼ぶ。

$$\sum_k Q_i(I'_k) = 1, \quad 0 \leq Q_i(I'_k) \leq 1 \quad (14)$$

$a_i$  のラベル  $kl$  のラベル確率  $P_i(I_{kl})$  は， $kl$  に対して高いラベル確率を持つ  $a_j$  が  $a_i$  の近傍に存在するならば， $a_i$  が  $kl$  を持つことに関する矛盾は少ないと考える。ただし， $a_j$  は  $a_i$  近傍  $(x_j, y_j)$  に位置する画像1から抽出された車両とする。この場合，より高い確率を持つように更新する。さらに，同一の車両の組についての逆方向のラベル確率が高いラベルについては矛盾が小さいとして，より高い確率を持つように更新する。そこで，まず  $a_i$  のラベル  $kl$  の局所的な無矛盾度  $\hat{P}_i(I_{kl})$  および  $\hat{Q}_i(I'_{kl})$  を次式で定義する。

$$\hat{P}_i(I_{kl}) = \sum_j \sum_{l' \in L'} P_j(I_{kl'}), \quad (l=1, 2, \dots, L) \quad (15)$$

$$\hat{Q}_i(I'_{kl}) = \sum_j \sum_{l' \in L'} Q_j(I'_{kl'}), \quad (l=1, 2, \dots, L) \quad (16)$$

ただし， $a_i$  の  $kl = (x_{kl}, y_{kl})$  に対してある程度の位置ずれ  $T$  を許容して，式(17)を満足する  $a_j$  の  $kl'$  は  $kl$  と類似すると考える。

$$\sqrt{(\Delta x_{kl} - \Delta x_{kl'})^2 + (\Delta y_{kl} - \Delta y_{kl'})^2} \leq T \quad (17)$$

式(15)，(16)の  $L'$  は式(17)を満足する類似ラベル  $kl'$  の集合である。式(17)を満足する  $kl'$  をもつ  $a_j$  が近傍に存在しない場合， $\hat{P}_i(I_{kl}) = 0$  となり，その他の場合は， $\hat{P}_i(I_{kl}) > 0$  となる。 $a_j$  としては，式(18)を満足するように選択される。

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \leq R \quad (18)$$

逆方向の  $b_j$  の  $'_kl$  についても同様にして  $\hat{Q}_i(I'_{kl})$  を与える。

ラベル確率の更新は， $\hat{P}_i(I_{kl})$  および  $\hat{Q}_i(I'_{kl})$  を用いて次のようになされる。

$$P_i^{(\text{new})}(I_{kl}) = \frac{P_i^{(\text{new})}(I_{kl})}{\sum_{l' \in L_i} P_i^{(\text{new})}(I_{kl'})}, \quad (l=1, 2, \dots, L, p) \quad (19)$$

ただし，

$$P_i^{(new)}(I_p) = P_i^{(old)}(I_p) \quad (20)$$

$$P_i^{(new)}(I_{kl}) = P_i^{(old)}(I_{kl})(A + B\hat{P}_i^{(old)}(I_{kl}) + CQ_i^{(old)}(I_{kl})) \quad (21)$$

(l=1,2,...,L)

逆方向についても同様に，

$$Q_j^{(new)}(I'_{kl}) = \frac{Q_j^{(new)}(I'_{kl})}{\sum_{l' \in L_i} Q_j^{(new)}(I'_{kl'})}, (l=1,2,...,L, p) \quad (22)$$

ただし，

$$Q_i^{(new)}(I'_p) = Q_i^{(old)}(I'_p) \quad (23)$$

$$Q_i^{(new)}(I'_{kl}) = Q_i^{(old)}(I'_{kl})(A + B\hat{Q}_i^{(old)}(I'_{kl}) + CP_i^{(old)}(I'_{kl})) \quad (24)$$

(l=1,2,...,L)

式(21), (24)におけるA, B および C は適当に設定される正の定数である。

式(19) ~ (24) によるラベル確率の更新を各  $a_i(i=1,2,...,L, p)$  に対して並列的(独立)に行う処理を1回の反復処理とし，ラベル確率の変化がなくなる状態になる(収束する)まで反復を行うことでラベルを決定する。

反復回数については従来の確率的弛緩法に関する研究<sup>2),5)</sup>では10回程度で十分とされているが，本研究では双方向による更新を利用するため，従来法と比較して若干収束が遅くなる。このため，本研究における実験では反復の最大回数を50回とした。

#### 4. 適用実験

適用実験においては，交通流シュミレーションデータに対する提案手法の有効性の確認(4.1)，サンプル実画像に対する適用可能性評価(4.2)を行う。さらに，撮像間隔と追跡精度に関する考察(4.3)を試みる。

##### 4.1 提案手法の有効性の確認

提案手法の有効性を確認するため，シュミレーションデータを用いた車両追跡実験を行った。シュミレーションデータとして，交通マイクロシュミレータ PARAMICS(PARAMICS TRAFFIC SIMULATION

LTD.：(株)社会システム研究所所有)による連続シュミレーション画像を用いた。対象道路は1方向2車線，単路部，対象範囲2km，撮像間隔1.5秒とし，抽出車両数は第1画像，第2画像においてそれぞれ52, 51(消失1)である。適用した手法は以下の4手法である。

(a)単方向確率的弛緩法(単方向法)

初期確率については可能状態ごとに均一とし，順方向ラベル確率のみを考慮。

(b)色情報利用単方向確率的弛緩法(色利用単方向法)

初期確率に色情報を利用し，ラベル確率更新には単方向アルゴリズムを採用する。

(c)双方向確率的弛緩法(双方向法)

初期確率については可能状態ごとに均一とし，ラベル確率更新には双方向アルゴリズムを採用する。

(d)色情報利用双方向確率的弛緩法(色利用双方向法)

初期確率に色情報を利用し，ラベル確率更新には双方向アルゴリズムを採用する。

ただし，各手法中のパラメータは網羅的に試行し，それぞれにおいて最も適用性の高いものを比較の対象とした。

画像中におけるすべての車両が抽出された場合(出現・消失なし)と10%程度の車両が抽出されなかった場合(出現・消失あり)の2通りについて実験を行った。得られた結果は表1の通りである。「出現・消失がない場合」と「出現・消失がある場合」とともに，本研究で提案する色利用双方向法の正答率は100%となり，他手法と比較してその有効性を確認することができた。車両の出現・消失についてもその台数を総車両数の10%程度と比較的大きな値を設定したにも関わらず，良好な値を得られたことは，出現・消失に対する手法の頑健性を示している。

表1 シュミレーションデータによる正答率

	出現・消失なし	出現・消失あり
(a)単方向法	82.7%	80.1%
(b)色利用単方向法	88.5%	91.5%
(c)双方向法	98.1%	97.8%
(d)色利用双方向法	100.0%	100.0%



図2 サンプル実画像

#### 4.2 サンプル画像に対する適用可能性の検討

##### (1) シミュレーションデータによるパラメータ設定

3. に見るように実際の観測データに手法を適用する際には、いくつかのパラメータを設定する必要がある。ここではこれらのパラメータの設定を行う。式(17)、(18)における  $T, R$  および車両の最大移動可能距離を表わす  $D$  については、車両の最高速度等の物理的移動特性や対象とする道路の種別により、適当な実際空間距離を定め、画像上におけるピクセル距離と実際の距離との縮尺を考えることにより、採用する  $T, R$  および  $D$  を決定することができる。

しかし、式(21)、(24)におけるパラメータ  $A, B, C$  については、対象とする道路ネットワーク形状や交通流の状態、撮像間隔等により影響を受けることが予測され、適切な値を一意に定めることは難しい。これらパラメータの適切な値は実験により求めるほかはないと考えられる。そこで、本研究では実際の計測を想定し、交通流シミュレーションを用いてパラメータを設定する。これは、観測対象に類似したネットワークをシミュレーションにより再現し、各パラメータを適当に変化させたうえで車両追跡実験と精度評価を行い、適切な各パラメータを求めるものである。本節の実験を行う上では、サンプル実画像と諸条件の類似したシミュレーションデータを作成し、5段階の交通流の状態に対して得た精度の平均をもって各パラメータの組み合わせの妥当性を評価した。

実際にパラメータは次の値を用いた。

$$A = 0.5, B = 1, C = 1, T = 20, R = 200, D = 150$$

ただし、各パラメータについて、 $A$  は 0 から 1 まで 0.1 間隔、 $B, C$  は 0 から 10 まで 0.2 間隔で変化させた。

##### (2) 車両追跡実験結果

サンプル実画像に対して車両追跡実験を行った。サンプル実画像は(株)朝日航洋による HDTV 画像(図 2)を用いた。データに関する諸元は以下の通りである。

撮影プラットフォーム：ヘリコプター  
撮影時間：1996年3月16日  
対象地域：淀川領域  
対象道路区間：約700m(1方向2車線)  
撮影高度：約500m  
撮像間隔：1.5秒  
空間分解能：0.33m  
バンド数：3 (8bit RGB 値)  
画像サイズ：1920×650 pixels  
抽出車両数 第1画像：47  
第2画像：48(出現1)

各パラメータは前項において求めたものを使用した。

4.1 と同様に、画像中におけるすべての車両が抽出された場合(出現・消失なし)と 10%程度の車両が抽出されなかったとした場合(出現・消失あり)の 2 通りについて 4 手法を適用した。

なお、車両の抽出に関しては目視判読により車両と思われる領域の重心位置を特定し、色情報の利用に際しては、車両部分の RGB 値それぞれの平均値を車両の色として採用した。また、精度評価のための正解ラベルは、撮像間隔の短い複数の時系列画像を用い、目視判読により決定した。

得られた結果は表 2 である。サンプル実画像に対しても本研究で提案する色利用双方向法が最も高い正答率を示し、正答率の値自体も 95%以上となり、その有効性を確認することができた。色情報を利用しない双方向法については、単方向アプローチの両者よりは正答率が高いものの、色利用双方向法と比較して正答率に大きな差が見られた。これは、最終的に 2 つの候補

が残り、収束しなかったために生じている。色情報を利用しない場合、初期確率は可能状態ごとに同一となるため、その他の条件が等しい2つのラベルが生じた場合には利用可能な情報の差が全くなり、一方のラベルに限定することが不可能となる。確率的弛緩法のアルゴリズム自体は、局所的な速度矛盾が生じないことのみを条件としており、それ以外に何ら候補となっているラベルを評価するステップはない。以上のことから、ラベルに対して近傍との類似度以外の情報を直接的に考慮できるという点で色利用双方向法は非常に優位なものであるといえる。

表2 サンプル実画像データによる正答率

	出現・消失なし	出現・消失あり
(a)単方向法	78.7%	75.6%
(b)色利用単方向法	80.9%	75.6%
(c)双方向法	83.2%	78.9%
(d)色利用双方向法	95.8%	96.7%

#### 4.3 撮像間隔に対する追跡可能性の検討

4種類の撮像間隔 0.5秒, 1.5秒, 2.5秒, 4.0秒のサンプル実画像に対して、色利用双方向法による車両追跡実験を行った。データ諸元は4.2におけるものと同じである。

得られた結果は表3のようになった。撮像間隔の短いものほど追跡精度は良好な値となった。撮像間隔と追跡精度の関係は、観測対象の道路特性、交通流特性に大きく依存すると考えられるため、本項における結果はあくまでも2車線単路部に対する結果として捉えるべきだが、0.5秒間隔と1.5秒間隔のデータに対する精度は比較的高いものとなっている。これと比較して2.5秒間隔, 4.0秒間隔の精度は80%以下である。すなわち、少なくとも本実験の範囲では、1.5秒程度の撮像間隔であれば十分な精度での車両追跡は可能であるといえる。

表3 異なる撮像間隔に対する結果

$t$ (秒)	正答率
0.5	100.0%
1.5	97.9%
2.5	78.9%
4.0	70.5%

なお、全ての実験において、処理時間は一般的なコンピュータ (CPU: Pentium 266MHz, RAM: 128MB) により行い、概ね60秒程度であった。

#### 5. おわりに

本研究では、連続的に撮影された画像から車両を追跡する手法として色情報利用双方向確率的弛緩法を提案し、既存手法との比較実験を通してその有効性を実証した。これにより、成層圏プラットフォームに代表される高分解能定点観測システムを利用した新たな交通流計測の実現可能性を指摘することができた。

今回は、単路部に対して確率的弛緩法を用いたが、より複雑な道路種別、交通流状態への適用、外的情報の利用、その他の手法の比較検討などが今後の課題といえる。

#### 謝辞

本研究は、清水が地球科学技術推進機構による地球科学技術フォーラム/地球観測委員会 成層圏プラットフォームグループに加えていただいたことを契機として行ったものである。同委員会 観測 WG 主査の下田陽久先生(東海大学)、利用WG主査の安岡善文先生(東京大学)をはじめとする委員会のメンバーの方々との議論は本研究を進める上で大いに参考となった。また、桑原雅夫先生(東京大学)からは本研究の交通工学的な意義について貴重なご意見を頂いた。なお、本研究の実施に際し、シュミレーションデータの作成においては、趙勝川氏((株)社会システム研究所)、サンプル実画像データにおいては津留宏介氏、田口俊明氏((株)朝日航洋)に多大な御協力を頂いた。

上記記して感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 桑原雅夫: ビデオ画像による車両動体計測システムの開発, 平成 5,6,7 年度科学研究費補助試験研究 (B) 研究成果報告, 1997.
- 2) 高木幹雄, 下田陽久: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp.707-746, 1991.
- 3) 画像処理ハンドブック編集委員会: 画像処理ハンドブック, 昭晃堂, pp.249-250, 303-307, 1987.
- 4) 近江和生, 李航宇: PIV 標準画像を用いた緩和法 PTV の性能評価, 可視化情報, Vol.18, Suppl. No.2, pp. 113-114, 1998.
- 5) Barnard, S.T., Thompson, W.B.: Disparity Analysis of Images, IEEE Transaction of Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI 2-4, pp.333-340, 1980.