

多様なデータを用いた実世界変化の 再構成手法に関する基礎的研究

(A Basic Study on the Reconstruction of Dynamical Change
of Real World Integrating Many Kinds of Data)

平成14年3月

関本 義秀

概要

ライフラインの施設の維持管理や、固定資産課税における課税客体（土地・家屋など）の異動管理などのいわゆる古典的な応用分野から、ITS(Intelligent Transport System：高度道路交通システム)における交通状況の把握やガイダンス情報の提供、マーケティング活動の支援、地震発生後の緊急対応支援などの分野へも GIS の応用範囲が広がることが期待されている。こうした分野では、よりダイナミックに変動する事象を対象に情報を収集し、その現況を把握、さらに将来の動きを予想することなどが必要となる。つまり、従来からの地図や統計に比べ、より細かい時間分解能はもちろん、より高い空間分解能、あるいは詳細な属性情報が時空間データベースに必要とされと考えられる。

一方、近年のデータ取得技術の高度化により、様々な時空間データが取得可能になってきている。非集計データでは、GPS、PHS だけではなく、ジャイロや加速度計、PEAMON(PErsonal Activity Monitor)あるいはそのような計測機器によるものだけではなく、チケット予約データ、クレジットカード情報さらに携帯電話・PHS のログ情報による位置特定は可能である。また集団の動きをとらえた集計データとして、パーソントリップ調査、国勢調査、あるいは鉄道における自動改札データや路上で通過人数（台数）をカウントするトラフィックカウンタ、あるいはコンビニエンスストア等の POS データやイベントデータでは年齢・性別等とセットで時空間的な位置情報が特定可能である。あるいは、監視カメラのようなものではより詳細な位置や行動モードも判別可能である。

このように様々な時空間データが取得可能になってきているものの、それらは断片的なデータであり、様々な利用形態のニーズにびったり対応した分解能や項目のデータが必ずしも直接得られるわけではない。計測やモニタリング作業から得られる多様なデータをつき合わせ、解釈して対象物の時間的、空間的な分布やその変化状況を推定するプロセスが必要不可欠であるといえる。いいかえると、断片的に次々得られる多種多様なデータから、地物に関する連続的（稠密）な時空間データベースを再構成するシステムをいかに構築するかが重要でありこれが本研究の目的である。

データ編集・統合の自動化を実現しようという観点からこれまでの空間データ取得技術・統合化技術に関する研究とデータベース構築・管理に関する研究を概観すると、両者が一般的には切り離されて進められていることがわかる。すなわち、様々な「断片的」データを集めて解釈・総合化する編集過程を通じて、様々な地物等の空間的な分布や時間的な変化を表現する「編集済み」データがまず作成され、その後、データベースに入力されると、多くの場合想定されている。

たとえば、時空間データベースに関する多くの研究も、地物などの時空間的な分布や変化を記述した「編集済み」時空間データがあるという前提にたち、そのデータを効率的にデータベース化するという観点から研究が主に行われてきた。しかしこうしたアプローチは、地物などの状況・変化の推定という立場から見た場合、地物等の状態推定プロセスが別立てになっている点や観測データがデータベース化されておらず、観測データと地物等との対応が不明確になりがちである。また地物等の状態推定を念頭において GIS データベースがデザインされていないために、観測データ以外の推定に必要な情報がデータベースから欠

落する可能性がある。

以上のような問題点を克服するためには、データ取得・統合化プロセスとデータベース構築・更新プロセスを一体化し、観測データと地物データ等も含めて推定過程に必要なデータを管理する「拡大」時空間データベースを構築することが必要となる。そのためにはさらに、地物等の時空間変化や観測データを表現する概念モデルの開発から、それに基づいたデータベースの実装、多様なデータを用いた地物等の状況・変化の推定モデル・手法まで様々な課題が解決されねばならない。

本研究では前者の地物の変化や観測データを表現する概念モデルとして、実世界の変化する様子を地物 (Feature) とイベント (Event) と観測 (Observation) の3種類のオブジェクトで表現する FEO モデルを提案し (図 3.1), また、後者の推定アルゴリズムについても以下のような流れを提案した (図 4.1)。

もちろんいくつかの分野では対象となる地物等や観測手段の特性に応じて、多様な観測データから地物等の状況を推定するシステムや手法の検討が進められている。たとえば交通工学、土地利用ではそのような研究が散見されるものの、それらの検討も比較的近年始められたものであり、他の分野に波及する例はまだ少ない。上記の表現モデルに代表されるような、より一般性の高い概念レベルの検討をすることで、個別の文脈で検討・開発されてきた統合手法、データベース化手法など相互の位置付けを明らかにすることが出来、新たな分野への展開や手法の一層の深化を図ることができると期待される。

実際にシミュレーション実験により、図 3 のように地物そのものの状況 (この場合は人間の時空間位置) を表す非集計的な観測データが十分ではない場合 (ここでは3分おきに3つしか GPS データがない) でも、図 4 のように、他の断片的な観測データや地物そのものに関する知識からある程度地物の1分おきの状況を再現することができた。

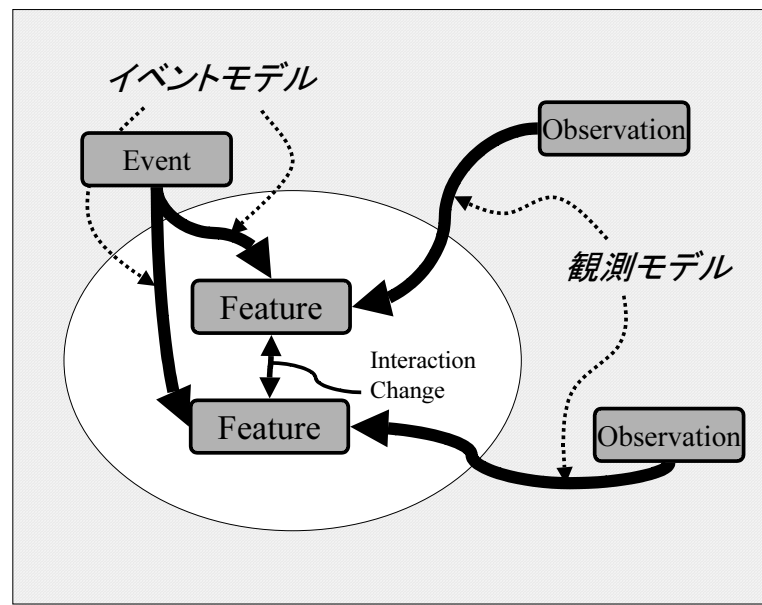


図 1: FEO モデル

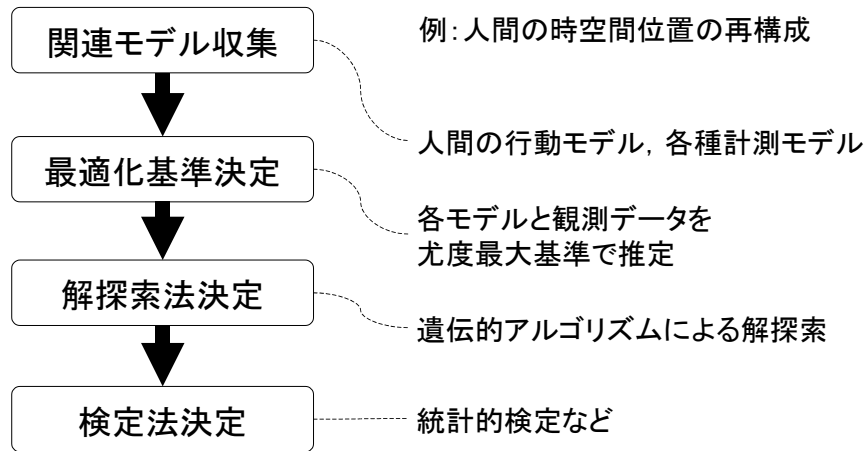


図 2: 再構成アルゴリズム



図 3: 真の軌跡と観測データ

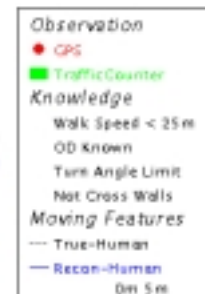


図 4: 真の軌跡と再現した軌跡の比較

目次

概要	1
第 1 章 本論文の構成	1
第 2 章 推論型 GIS の枠組み	3
2.1 既存の確定型 GIS に対する推論型 GIS	3
2.1.1 時空間データに対するニーズの高度化	3
2.1.2 時空間データ取得技術の向上	4
2.1.3 データ統合に対する既存のアプローチの問題点	4
2.1.4 本研究のアプローチ	6
2.2 推論型 GIS が目指す世界	7
2.3 既存の情報システムとの比較	8
第 3 章 実世界における地物のダイナミックな変化を記述する概念モデル	10
3.1 FEO モデル	10
3.1.1 構築にあたっての基本的な考え方	11
3.1.2 フィーチャーモデル	11
3.1.3 イベントモデル	13
3.1.4 オブザベーションモデル	16
3.1.5 フィーチャー、イベントとオブザベーションの相互関係	18
3.2 FEO モデルに基づく地物等の推定方法の概観	19
3.3 FEO モデルの適用例	19
3.3.1 航空写真と行政情報による課税対象家屋の異動判読	19
第 4 章 地物再構成の基本アルゴリズム	21
4.1 再構成アルゴリズム概要	21
4.2 再構成アルゴリズム	26
4.2.1 各オブジェクトの表現	26
4.2.2 解の初期生成法	29
4.2.3 解の評価	29
4.2.4 GA を用いた最適解の探索方法	31
4.3 再構成した解の評価	32
4.3.1 真値と非集計的に比較評価する場合	32

4.3.2	真値と集計的に比較評価する場合	32
4.3.3	真値がない場合	32
4.4	システムの構築	33
4.4.1	システムの提供する機能	33
4.4.2	システムの設計	33
4.5	数値実験例	35
4.5.1	使用データ	35
4.5.2	結果	35
第 5 章	再構成の精度向上と計算時間の効率化	40
5.1	再構成問題にマッピングする際の精度・効率向上方法	41
5.1.1	地物の表現の工夫	41
5.1.2	観測の表現の工夫	43
5.1.3	知識による地物の表現	50
5.2	GA による最適化問題にマッピングする際の精度・効率向上方法	59
5.2.1	GA のパラメータの比較	59
5.2.2	遺伝子表現における解像度の比較	61
5.2.3	知識を利用した遺伝子の初期生成	63
5.2.4	知識を利用した遺伝子の交叉	63
5.3	計算機処理時の精度・効率向上方法	66
5.3.1	プログラム実行環境の検討	66
5.3.2	並列化による分散処理の検討	67
第 6 章	大規模問題への適用に関する考察と試算	68
6.1	概要	68
6.2	規模の定義	69
6.3	問題の規模と収束に必要な観測オブジェクト数と世代数との関係	70
6.4	展示会場を想定した人の流動再現	70
6.5	都市圏における人々の一日の行動再現への適用可能性の検討	74
第 7 章	結論と今後の課題	75
7.1	結論	75
7.2	今後の課題	76
付録 A	四次元ライブラリの構築	77
A.1	時間に関する研究の流れ	77
A.2	地理情報における標準化活動の現状	80
A.3	四次元ライブラリパッケージの構築	80
A.3.1	空間における幾何形状パッケージ	80
A.3.2	空間における位相形状パッケージ	82
A.3.3	時間パッケージ	84

A.3.4	時空間パッケージ	87
付録 B	システム詳細	89
B.1	システム概要	89
B.2	システムが提供する機能	90
B.2.1	観測をシミュレートする	90
B.2.2	再構成を行う	91
B.2.3	時空間データを表示する	94
B.3	各種オブジェクトに関するパッケージ	97
B.3.1	地物に関するパッケージ	97
B.3.2	観測に関するパッケージ	100
B.3.3	地物に関する知識パッケージ	103
B.3.4	共通となるインターフェイス	106
B.4	GA に関するパッケージ	107
B.5	その他のパッケージ	108
付録 C	複数の交通モードの変化を考慮したマルチモーダルな最短経路探索	109
C.1	目的	109
C.2	提案する方法	109
C.3	比較実験	114
付録 D	「人を測る」プロジェクトにおける人の時空間位置再構成の試み	115
D.1	実験概要	115
D.2	観測データ	115
D.3	一人の時空間位置の再現	122
付録 E	PEAMON の解析	125
E.1	PEAMON とは	125
E.2	アンテナの配置と PEAMON のチェックポイント	126
E.3	解析方法と結果	126
E.4	精度向上の工夫	130
付録 F	「人を測る」プロジェクトで得られたデータ	135
F.1	一般アンケート	135
F.2	企業ブースアンケート	139
F.3	トラフィックカウンタデータ	141
F.4	巡回カメラ	143
研究発表		145
謝辞		151

目次

1	FEO モデル	II
2	再構成アルゴリズム	III
3	真の軌跡と観測データ	III
4	真の軌跡と再現した軌跡の比較	III
1.1	本論文の構成	2
2.1	時空間的により詳細に実世界を知りたいというニーズ	3
2.2	断片的なデータをつなぎ合わせる必要性	6
2.3	拡大時空間データベース	7
2.4	推論型GISにより実現可能な世界	8
2.5	既存のシステムとの比較	9
3.1	FEO モデルの概要	10
3.2	様々な地物の変化例	12
3.3	フィーチャーの変化	13
3.4	イベントモデル	14
3.5	オブザベーションモデル	16
3.6	フィーチャーとイベントとオブザベーションの相互関係	18
3.7	制御システムの状態空間表現との類似	18
3.8	家屋の移動判読における FEO モデルの適用	20
4.1	再構成アルゴリズムの概念フローと人間の時空間位置再現における例	22
4.2	本研究での最適化基準とその計算例	23
4.3	様々な地物の時空間位置を遺伝子で表現	24
4.4	GA を用いた探索の手順	25
4.5	地物オブジェクトの遺伝子表現（例：人間の時空間位置）	26
4.6	対応する時空間位置表現（上段：真の軌跡, 下段左：空間範囲がグリッド, 時間範囲が区間として表現した場合, 下段右：空間範囲が小さい半径のエリア, 時間範囲が瞬間として表現した場合）	27
4.7	観測時の時空間範囲（左：GPS, 右：トラフィックカウンタ）	27
4.8	擬似観測	30
4.9	擬似観測データに対する観測データの尤度算出	30

4.10 解を改善する方法	31
4.11 システム概要図	34
4.12 真の軌跡と 1 分ごとに得られた GPS データ	37
4.13 再構成した軌跡との比較	37
4.14 真の軌跡と 3 分ごとに得られた GPS データ	38
4.15 再構成した軌跡との比較	38
4.16 真の軌跡と 3 分ごとに得られた GPS データと 6 箇所に配置したトラフィックカウンタ	39
4.17 再構成した軌跡との比較	39
5.1 各ステップでの改善方法	40
5.2 地物表現の比較	42
5.3 内挿により可能になるサンプリング	43
5.4 時空間内挿のタイプ（左上：内挿なし，右上：直線内挿，左下：最短経路内挿，右下：確率的経路選択内挿	44
5.5 内挿しないことによる精度の悪化	45
5.6 内挿による精度の向上	45
5.7 GPS 誤差分布に正規分布を仮定した場合（誤差：小）	47
5.8 GPS 誤差分布に等生起確率分布を仮定した場合（誤差：小）	47
5.9 GPS 誤差分布に正規分布を仮定した場合（誤差：大）	48
5.10 GPS 誤差分布に等生起確率分布を仮定した場合（誤差：大）	48
5.11 制約移動距離：5m	51
5.12 制約移動距離：15m	51
5.13 制約移動距離：25m	51
5.14 制約移動距離：35m	52
5.15 制約移動距離：45m	52
5.16 制約移動距離：55m	52
5.17 移動空間制約	53
5.18 移動空間制約がない場合	54
5.19 移動空間制約がある場合	54
5.20 ターン角度の制約	55
5.21 制約角度：30 度	56
5.22 制約角度：60 度	56
5.23 制約角度：90 度	56
5.24 制約角度：120 度	57
5.25 制約角度：150 度	57
5.26 制約角度：180 度	57
5.27 知識表現の比較	58
5.28 基本的な GA のパラメータによる収束状況の比較	60
5.29 普通の場合の軌跡	62
5.30 知りたい時間間隔を複数の遺伝子で構成することにより再構成した軌跡	62

5.31 ランダムな生成	64
5.32 距離制約のみ既知の時	64
5.33 起点のみ既知の時	65
5.34 起終点ともに既知の時	65
5.35 実行までの手順	66
6.1 計算時間の算出過程	68
6.2 解空間の広さをを用いた規模の定義	69
6.3 いくつかの問題の規模の定量化	70
6.4 100 人の真の時空間位置	72
6.5 100 人の再構成された時空間位置	72
6.6 100 人の真値と再構成値をブース滞在人数に集計し直して比較したもの	73
7.1 非集計地物と集計地物の混合	76
A.1 空間における幾何形状パッケージ	81
A.2 基本的な幾何形状	81
A.3 空間における位相形状パッケージ	83
A.4 基本的な位相形状	83
A.5 時間における幾何形状パッケージ	85
A.6 時間の基本的な幾何形状	85
A.7 時間の相互関係	86
A.8 時空間における幾何形状パッケージ	87
A.9 基本的な時空間幾何形状	88
B.1 システムパッケージ図	89
B.2 結果画像の自動生成	94
B.3 静的地物オブジェクトデータファイルの選択	94
B.4 静的地物オブジェクトの表示	95
B.5 動的地物オブジェクトデータファイルの選択	95
B.6 動的地物のアニメーション表示	95
B.7 エリアごとの人数を色で表示	96
B.8 GFeature のインターフェイス	97
B.9 GObservation のインターフェイス	100
B.10 STKnowledge のインターフェイス	103
B.11 オプションとして実装可能なインターフェイス	106
B.12 遺伝子のインターフェイス	107
C.1 地物表現したネットワークとインターモーダルなトポロジー表現したネットワークの対応	110
C.2 マルチモーダルな最短経路探索アルゴリズム	111
C.3 提案アルゴリズムのラベルの更新状況	112

D.1	会場風景	116
D.2	展示会場見取り図	117
D.3	各観測概要	118
D.4	観測配置図	119
D.5	レーザー計測結果（柴崎研究室石原氏より）	120
D.6	観測結果と問題点	120
D.7	会場入口での PEAMON 被験者募集	121
D.8	トラフィックカウンター計測	121
D.9	熱赤外による計測	121
D.10	レーザーによる計測	121
D.11	巡回カメラ	121
D.12	アンケート	121
D.13	PEAMON による位置特定結果	122
D.14	実験 1	123
D.15	実験 2	123
D.16	実験 3	124
E.1	PEAMON の外観	125
E.2	PEAMON の内部 (http://www.e-tsu.org/index2a-1c.html より)	125
E.3	パワーアンテナ	126
E.4	アンテナの配置とチェックポイント	127
E.5	解析の概要フロー	128
E.6	あるアンテナの減衰パラメータの推定	128
E.7	上位受信アンテナの影響範囲の重ね合わせ	129
E.8	ある人の軌跡	129
E.9	アンテナデータの使用方法の比較（上段図：全ての順位使用，中段図：上位 7 つの順位のみ使用，下段図：厳密に順位を守る必要なし）	131
E.10	時間間隔で間引いた場合の比較（左図：全てのデータ（15 秒間隔）を用いた場合，右図：1 分間隔に間引いた場合）	132
E.11	時間の平滑化比較（上段図：平滑化せず，中段図：前後 15 秒で平滑化，下段図：前後 30 秒で平滑化）	134

表目次

2.1	時空間的状況を知ろうとした関連研究	4
2.2	現在利用可能な様々な時空間データ	5
2.3	将来利用可能性のある様々な時空間データ	6
3.1	フィーチャーモデル	11
3.2	イベントモデル	15
3.3	オブザベーションモデル	17
4.1	実験共通諸元	35
4.2	実験条件と再構成精度	35
5.1	自由空間型とネットワーク空間型の比較	42
5.2	時空間内挿によるサンプリング精度の比較（個体数 200, 世代数 200）	44
5.3	空間誤差分布の設定による再現精度比較	46
5.4	制約距離と精度の関係	50
5.5	移動空間制約を用いた精度と効率の比較	53
5.6	制約ターン角度と精度の関係	55
5.7	GA 基本的パラメータの検討	59
5.8	一定時間間隔に対する表現遺伝子数の違いによる精度と効率の比較	61
5.9	初期値生成の違いによる精度比較	63
5.10	CPU 速度による計算時間の比較（Windows2000,SunJDK1.3.0,Memory:128MByte 使用時）	66
5.11	OS と JDK の組み合わせによる計算時間の比較	67
6.1	実験共通諸元	71
6.2	対象人数による収束世代数, 計算時間, 収束精度の比較	71
C.1	格子状のネットワークにおける計算時間の比較	114
D.1	実験諸元	115
D.2	PEAMON と様々な知識を組み合わせた再構成の精度比較	123
E.1	PEAMON 実験の諸元	126

第 1 章

本論文の構成

本論文の構成は図 1.1 のようになっている。まず 2 章では様々な時空間データからダイナミックに変化する実世界を再構成する推論型 GIS のコンセプトについて述べる。3 章は様々な時空間データを整理し構造化してダイナミックに変化する実世界を表現しやすくすることを試みた概念データモデルを提案する。4 章は 3 章で提案したモデルに基づき構造化したデータを用いて、知りたい地物の状況について再構成するアルゴリズムを提案しシステムを実装した。5 章は実用に耐えうるレベルにするためには精度と計算速度の向上が必須であり、地物の表現からプログラム実行環境にいたるまで、様々な段階での検討を行った。6 章では 5 章の検討をもとに、より大規模な問題を解く際に検討すべき点を整理した。そして最後に 7 章で結論を述べる。また、付録 A では構築したシステムのベースとなる四次元パッケージの解説をし、付録 B では構築したシステムそのものについて、また付録 C ではネットワークの処理で必須となるマルチモーダルな経路探索について述べた。また本研究の一環として 2001 年 6 月に東京ビッグサイトで「人を測る」プロジェクトを行い、実データを得た。しかし実データを処理する以前に整理すべき事柄があるために、付録 D で今回は付録にその様子と一人分の再構成を行った結果を付記し、また付録 E はその際に用いた PEAMON の解析についての詳細を述べた。最後に付録 F にその際に取得したデータをのせた。

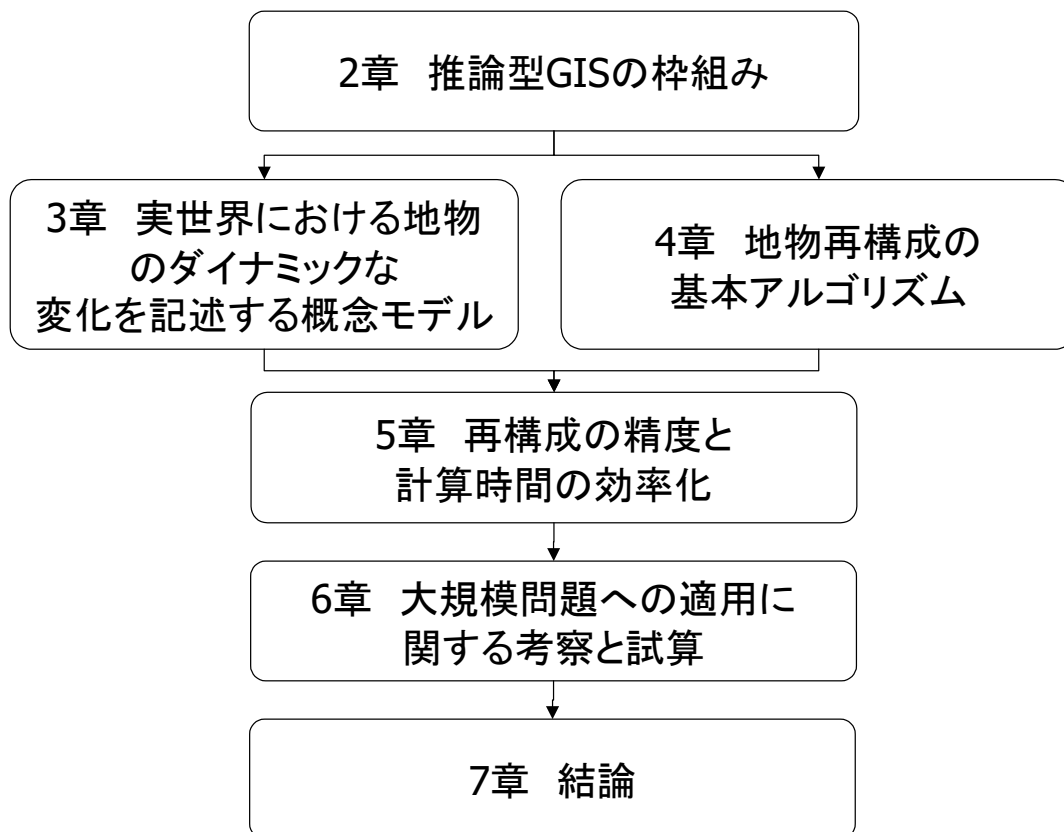


図 1.1: 本論文の構成

第 2 章

推論型 GIS の枠組み

2.1 既存の確定型 GIS に対する推論型 GIS

2.1.1 時空間データに対するニーズの高度化

ライフラインの施設の維持管理や、固定資産課税における課税客体（土地・家屋など）の異動管理などのいわゆる古典的な応用分野から、ITS(Intelligent Transport System：高度道路交通システム)における交通状況の把握やガイダンス情報の提供、マーケティング活動の支援、地震発生後の緊急対応支援などの分野へも GIS の応用範囲が広がることが期待されている。こうした分野では、よりダイナミックに変動する事象を対象に情報を収集し、その現況を把握、さらに将来の動きを予想することなどが必要となる。つまり、従来からの地図や統計に比べ、より細かい時間分解能はもちろん、より高い空間分解能、あるいは詳細な属性情報が時空間データベースに必要とされと考えられる（図 2.1）。実際にそのような高度化してきた時空間データのニーズに対応するために様々な研究が始められており、以下に簡単にまとめた（表 2.1）。



図 2.1: 時空間的により詳細に実世界を知りたいというニーズ

表 2.1: 時空間的状况を知ろうとした関連研究

ITS	交通流シミュレータ	SOUND, AVENUE, MITSIM, PARAMICS 等
防災	人間の避難行動のシミュレーション	[海老 95, 片山 94]
	救助活動のシミュレーション	[田所 00]
マーケティング	空間における人々の流動予測	[奥村 00, 山根 00, 二神 00, 岡本 01]

2.1.2 時空間データ取得技術の向上

一方、近年のデータ取得技術の高度化により、様々な時空間データが取得可能になってきている。特に、前述の ITS、防災、あるいはマーケティングに密接に関連する人間や車などの動きを知るために、現在利用できる時空間データを以下にまとめた（表 2.2）。まず、非集計データでは、GPS はカーナビ等ですでに広く使われている。また PHS に関しても GPS では電波を受信することが難しい屋内、あるいは建物が複雑に込み入った都市域などでロケーションサービスが始まっている。さらにジャイロや加速度計を用いることにより、歩行角度や歩行速度がわかり高精度な位置特定や行動モードの特定が可能になってきている。あるいは PEAMON (PErsonal Activity Monitor) は基本的には PHS と同じ機能を持つが、アンテナが配置されていない屋内や都市外の地域において、用意したアンテナを配置することにより、数秒間隔で付近のアンテナを特定し、記録することが可能である。また計測機器によるものだけではなく、チケット予約データ、クレジットカード情報による利用者の時空間位置の特定、さらに携帯電話・PHS のログ情報による位置特定なども可能であり例えば犯罪捜査などにも使われている。

また集団の動きをとらえた集計データも利用可能なものは多い。大規模な交通政策を立案する際によく用いられるパーソントリップ調査、国勢調査などに始まり、小規模のものでは、鉄道における自動改札データ（これは個人の ID を特定していれば非集計データと言える）や路上で通過人数（台数）をカウントするトラフィックカウンタ、あるいはコンビニエンスストア等の POS データやイベントデータでは年齢・性別等とセットで時空間的な位置情報が特定可能である。あるいは、監視カメラのようなものではより詳細な位置や行動モードも判別可能である。

さらにより効率的、高精度に時空間位置を特定するための研究は様々な所で進められており、このような成果を積極的に活用することにより、より新しい技術の萌芽を促進できる。例えば、非集計データでは擬似衛星を対象エリア内におくことにより位置特定を可能にするシュードライト、あるいは電子タグによるトラッキングデータ、また自動車の稼動状況データ（プローブカー）、あるいは IEEE Computer 誌のポジショニング特集ではまだそれほど耳にしないような様々な位置特定技術がまとめられている。また集計データでは、成層圏プラットフォーム、TLS (Three Line Sensor)、熱赤外画像による、人や車の流れの把握、あるいはレーザーを上や横からあて距離画像を得ることによる人の流れの把握、車輪のばねによる列車の搭載重量データからの乗客数把握、あるいは情報家電の稼動状況データによる室内の人数把握などがある。

2.1.3 データ統合に対する既存のアプローチの問題点

しかし、前節で述べたような様々な時空間データが取得可能になってきているものの、それらは断片的なデータであり、様々な利用形態のニーズにぴったりに対応した分解能や項目のデータが必ずしも直接得ら

表 2.2: 現在利用可能な様々な時空間データ

非集計データ	
GPS	多数
PHS	[朝倉 00], [喜村 00], [大森 00]
ジャイロ+加速度計によるトラッキング	[小西 01]
PEAMON	[岡本 00], [岡本 01]
万歩計	[森本 00]
チケット予約データ, クレジットカード情報	—
携帯・PHS のログ情報	—
集計データ	
パーソントリップ・国勢調査	多数
自動改札データ	—
トラフィックカウンタデータ	[奥村 00]
POS データ	—
イベントデータ	[朝倉 01]
監視カメラ・VSAM	[JR 東 00, 三菱 01, NMO00, MB00, RC00, L.W00, CS00, DA01, IH00, MCB+01, WM00]

れるわけではない。計測やモニタリング作業から得られる多様なデータをつき合わせ、解釈して対象物の時間的、空間的な分布やその変化状況を推定するプロセスが必要不可欠であるといえる（図 2.2）。いいかえると、断片的に次々得られる多種多様なデータから、地物に関する連続的（稠密）な時空間データベースを再構成するシステムをいかに構築するかが重要でありこれが本研究の目的である。

データ編集・統合の自動化を実現しようという観点からこれまでの空間データ取得技術・統合化技術に関する研究とデータベース構築・管理に関する研究を概観すると、両者が一般的には切り離されて進められていることがわかる。すなわち、様々な「断片的」データを集めて解釈・総合化する編集過程を通じて、様々な地物等の空間的な分布や時間的な変化を表現する「編集済み」データがまず作成され、その後、データベースに入力されると、多くの場合想定されている。

たとえば、時空間データベースに関する多くの研究も、地物などの時空間的な分布や変化を記述した「編集済み」時空間データがあるという前提にたち、そのデータを効率的にデータベース化するという観点から研究が主に行われてきた（たとえば、[Lan92] など）。しかしこうしたアプローチは、地物などの状況・変化の推定という立場から見た場合、地物等の状態推定プロセスが別立てになっている点や観測データがデータベース化されておらず、観測データと地物等との対応が不明確になりがちである。また地物等の状態推定を念頭において GIS データベースがデザインされていないために、観測データ以外の推定に必要な情報がデータベースから欠落する可能性がある。

表 2.3: 将来利用可能性のある様々な時空間データ

非集計データ	
シュードライド	[Cob97]
電子タグによるトラッキングデータ	—
自動車の稼動状況データ（プローブカー）	[青木 01]
Active Batt その他	[JH01]
集計データ	
成層圏プラットフォームからの画像データ	[清水 99]
TLS による画像データ	[RM01]
熱赤外画像データ	[MN01]
レーザーによる距離画像	[NI01]
列車搭載重量データ	—
情報家電の稼動状況データ	[高島 01, 折原 01]

実世界から断片的に
得られたデータ

全体像を把握するためには
つなぎ合わせる必要

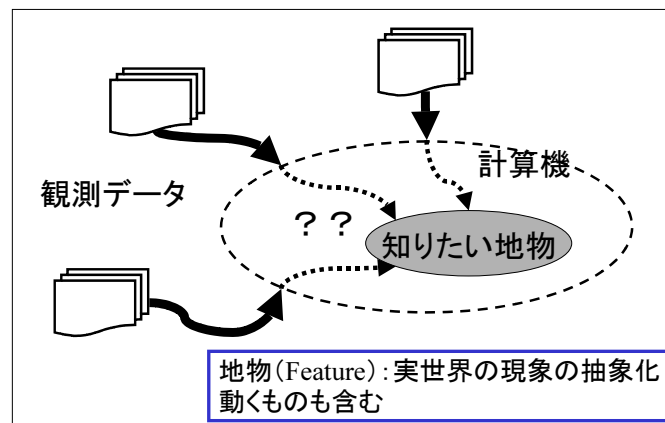


図 2.2: 断片的なデータをつなぎ合わせる必要性

2.1.4 本研究のアプローチ

以上のような問題点を克服するためには、データ取得・統合化プロセスとデータベース構築・更新プロセスを一体化し、観測データと地物データ等も含めて推定過程に必要なデータを管理する「拡大」時空間データベースを構築することが必要となる（図 2.3）。そのためにはさらに、地物等の時空間変化や観測データを表現する概念モデルの開発から、それに基づいたデータベースの実装、多様なデータを用いた地物等の状況・変化の推定モデル・手法まで様々な課題が解決されねばならない。

観測データを構造化し、地物を再構成する機構を含んだ、
「拡大」時空間データベース必要

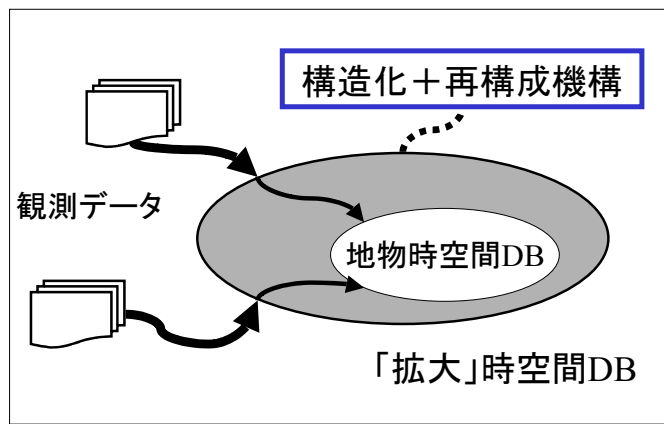


図 2.3: 拡大時空間データベース

本論文ではデータの構造化に関しては 4 章，再構成の方法に関しては 5 章で述べる。

もちろんいくつかの分野では対象となる地物等や観測手段の特性に応じて，多様な観測データから地物等の状況を推定するシステムや手法の検討が進められている。たとえば交通工学の分野に関しては路側観測交通量から交通状況を推定した小根山・桑原 [小根 97]，衛星データ等から土地利用状況を推定した Shibasaki and Huang [SH96] などがある。しかしそれらの検討も比較的近年始められたものであり，他の分野に波及する例はまだ少ない。上記の表現モデルに代表されるような，より一般性の高い概念レベルの検討をすることで，個別の文脈で検討・開発されてきた統合手法，データベース化手法など相互の位置付けを明らかにすることが出来，新たな分野への展開や手法の一層の深化を図ることができると期待される。

2.2 推論型 GIS が目指す世界

本論文で提案する推論型 GIS によりどのような世界が構築されるだろうか。例えば車両の渋滞状況，人の混雑状況などのように，ある地物の全体的な状況を知りたく，またそれが大規模で簡単には把握できない時，それを調査してくれる機関に委ねる。その機関は実世界のデータを集める必要が出てくる。しかしそのデータをすでに持っていて新たに計測・調査をするにしても，直接ニーズを満たす場合は多くないために，何を観測したデータなのかよく洗い出した後に，既存の知識や数式や今までのノウハウから，「こうなっているはずだ」という結果を出す。その結果を依頼者は取得することになるが，それは必ずしも客観的な結果ではなく，また人により異なる結果が出ることもありうる。本研究はそうように観測データをつき合わせて推定する部分がスムーズに自動化されることにより，ニーズに素早く，的確に対応できるようになることを目指す。それにより，さらに効率の良い，高精度な観測形態を模索できる可能性が広がる。また観測者自身に何を観測したものなのかというメタ情報もきちんと記録してもらうことにより，統合する立場から見た場合より付加価値の高いデータになることを認識される可能性が高くなる。図 2.4 はそのような，人が実世界を知りたいというニーズから一連の処理を得て，ニーズを満たすデータを取得するま

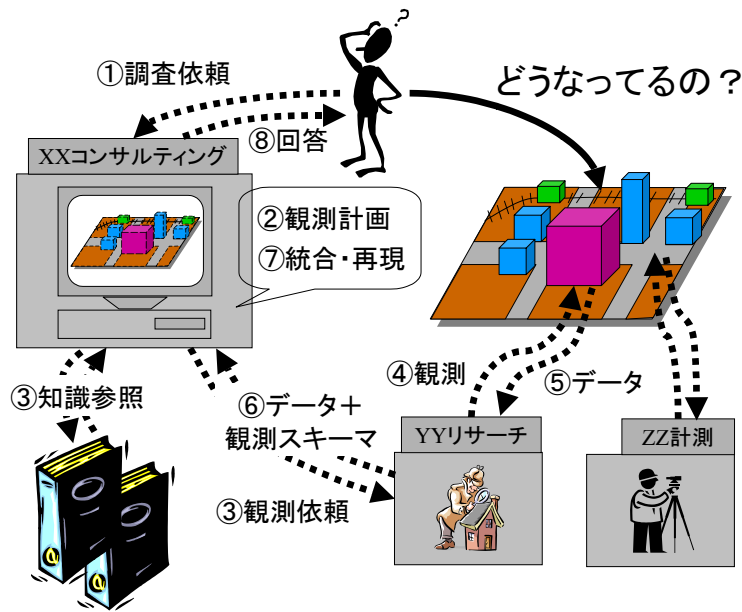


図 2.4: 推論型GISにより実現可能な世界

での過程を描いたものである。

2.3 既存の情報システムとの比較

近年のIT化の進展によって処理速度の向上やネットワークによる分散強調が可能になり、本研究でも恩恵をこうむる点が多いが、既存の情報システムとはどのような関係にあるのだろうか。Web(World Wide Web)、エキスパートシステム、CALS・EC、データマイニング等と比較してみた。比較の軸はいかに多くの所からデータを収集できるかという分散協調可能性、またどれだけ多くの種類のデータに対応できるのかというデータの多様性、また、データを統合することにより推論を行うレベルを表す推論の規模と正確性とした。

Webは大変普及しており、様々な情報を交換可能であるが、情報の欲しい人と持っている人が直接やり取りするために推論は情報を受ける人が直接行うことになり、データが大規模になったり誤差を含んだりするととたんに把握できなくなってしまう。エキスパートシステムは専門家による推論機能があるものの多様なデータへの対応はそれほどないと思われる。またCALS・ECはデータ交換によるものなので分散協調性は高いものの定型的なフォームであるために新たなデータへの対応はなく、それ自体は推論機能は持たない。またデータマイニングは様々なデータに対応することができ、分散協調性も高いが、知識や常識等を積極的に援用しにくいので、推論において高パフォーマンスがそれほど見込めないと思われる。

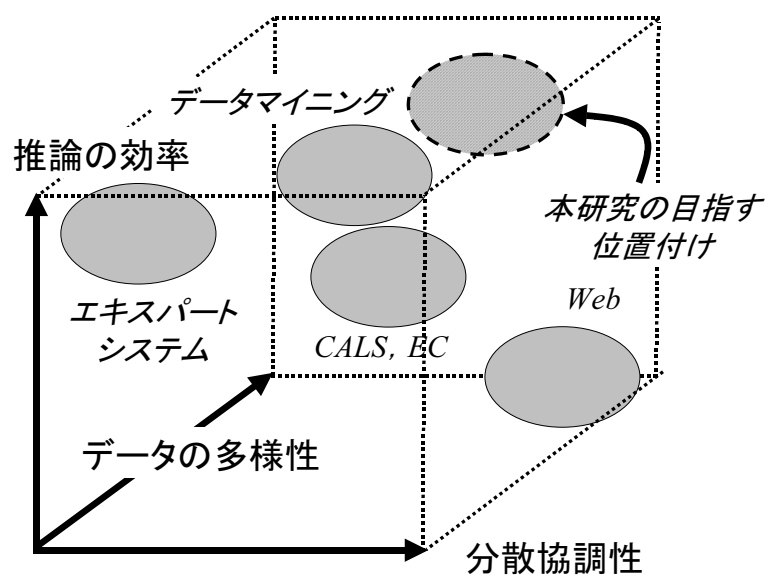


図 2.5: 既存のシステムとの比較

第 3 章

実世界における地物のダイナミックな変化を記述する概念モデル

3.1 FEO モデル

第 3 章では、地物だけではなく観測データも含んだ「拡大」時空間データベースのダイナミックな更新を可能にするための、概念レベルの表現モデルとして FEO モデルを提案する。FEO モデルはフィーチャー (Feature)、イベント (Event)、オブザベーション (Observation) の 3 つのモデルから構成される。フィーチャーは車両、人、建物のような実世界に存在する様々な地物を指す。イベントはフィーチャーに外生的変化を与える時空間的広がりを持つ「出来事」である。オブザベーションはイベントやフィーチャーを観測する活動とその結果（データ）である。イベントのフィーチャーに対する活動の枠組みをインパクトモデル、オブザベーションのフィーチャーに対する活動を観測モデルと呼ぶ（図 3.1）。その詳細は以下の節で説明する。

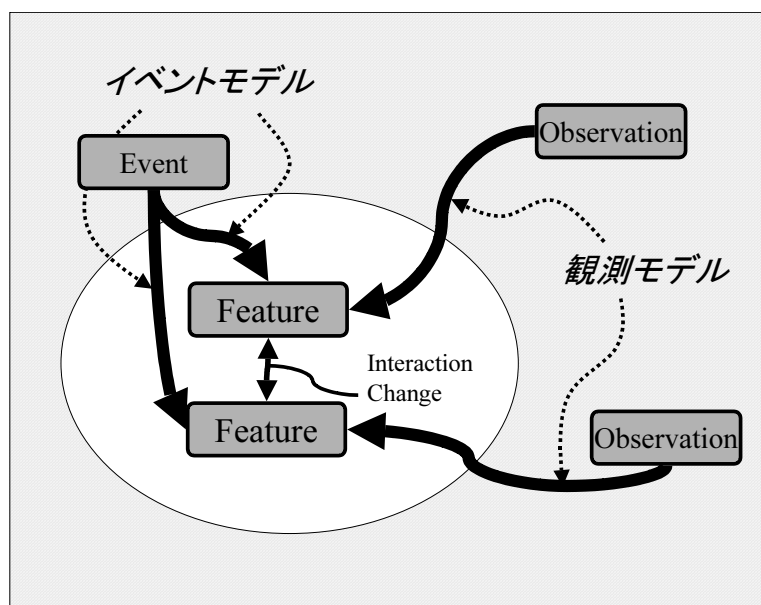


図 3.1: FEO モデルの概要

3.1.1 構築にあたっての基本的な考え方

概念モデルに必要な条件は以下のように整理される。

1. 不確実性も含み、地物等（フィーチャー）の時空間的な分布・変化を表現できること。
2. 地物等の時空間的な分布・変化を表現するデータと、そのデータを推定・構築する基となる観測データを区分し、地物等の時空間変化だけでなく、観測データをも明示的な時空間情報として取り込めること。
3. 地物等の変化は内生的な変化と外部から与えられた情報により外生的に与えられる変化がある。外生的、外乱要因としてのイベントを表現できること。

1 に関しては 3.1.2 で述べるように概に提案されているものに従うこととし、本論文では主たる研究対象としない。また 2 に関しては、観測の概念モデルが必要である。これまで、CEOS などさまざまな衛星画像を表現するモデルとして検討されている例 [CEO98] はあるが、一般的な観測を概念モデルとして表現している例はないため、本論文で提案する。3 に関しても、イベントの概念モデルが必要であるが、既存の研究事例がないため、本論文で提案する。

3.1.2 フィーチャーモデル

これまで GIS において様々な時空間データモデルが提案されてきた（詳しくは [関本 99]）。その中で、地理情報の標準化を目指す活動の一つとして ISO/TC211 が 1994 年から始まっており、General Feature Model が地理情報の最上位の概念モデルとして提案されている。そして General Feature Model を基にして、空間スキーマと時間スキーマが定義され、それぞれ幾何プリミティブと位相プリミティブを有している（原文は [ISO99a, ISO98]、解説に関しては、[柴崎 96, 柴崎 99] を参照）。本研究ではフィーチャーに関する表現方法は ISO/TC211 に準拠し、さらに動的に変化するフィーチャーまで拡張し、幾何、位相プリミティブを整理した [太田 99] に従うこととする。つまり、フィーチャーは表 3.1 のように構成され、それぞれ空間的、時間的プリミティブを持つ。フィーチャーの例を図 3.2 に示した。a) では、建物がポイントとして表され、動的には変化しない様子を示し、b) では都市や農地の範囲がサーフェスとして表され、動的に変化する様子を示している。これは土地の境界が mobile もしくは mutable であることを表す。また c) では、車両が道路上にあるという制約条件を持ったポイントとして表され、動的に変化する様子は車両が道路上を移動することを示している。

表 3.1: フィーチャーモデル

項目
フィーチャーの開始・終了
フィーチャーのふるまい
自身の変化
他のフィーチャーへの影響（アクション）
フィーチャー間の関係
フィーチャー属性

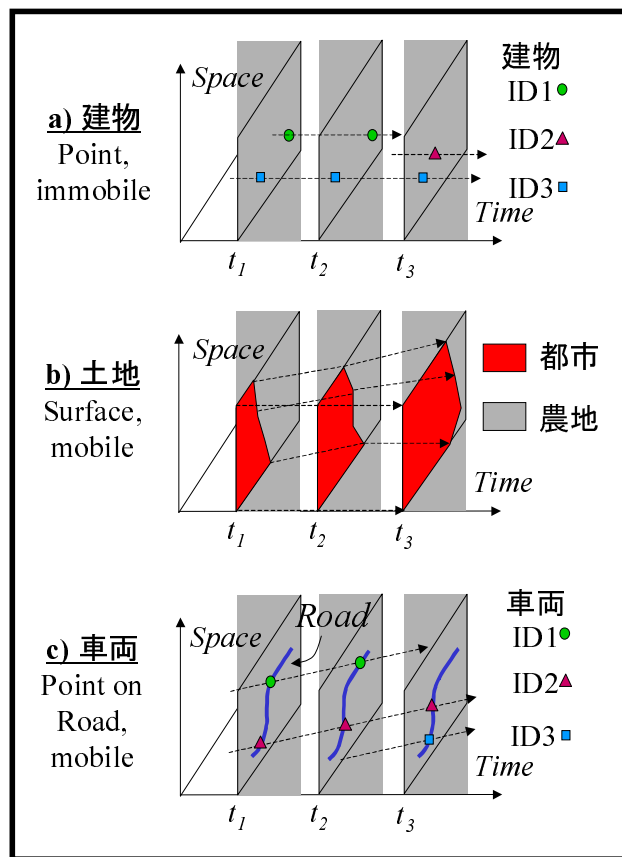


図 3.2: 様々な地物の変化例

なお、GIS データに関する標準化活動を行っている ISO/TC211 [ISO99b] によると、フィーチャーは、Abstraction of real world phenomena と定義されている。この定義に従えば、この世界の事象のすべてはフィーチャーとして表現できることから、観測データやイベントはすべてフィーチャーとなる。しかし、後述するようにダイナミックな更新を可能にする「拡大」時空間データベースを構築するためには、ISO/TC211 の定義する広義のフィーチャーの下に、いわゆる地物等を表現する狭義のフィーチャーと、観測（オブザベーション）、イベントの両概念を必要とすることから本研究では、フィーチャーの定義をより狭く解釈し、明示的に観測（オブザベーション）とイベントを別のモデルとして表現するとしている。また不確実性を含む、より一般的なフィーチャー表現のためにはより詳細な概念モデルを構築する必要があるが、[Shi94] のように土地・家屋に限定した研究が散見される程度であり、今後の研究課題とする。

3.1.3 イベントモデル

一般的にイベントはデータベース関連の分野では単なる変化点という文脈でとらえられることが多かった（たとえば [Pau95] など）。しかしフィーチャーの変化は以下のように分類される（図 3.3）。

1. フィーチャー自身の内在的な変化（例：建物が年数の変化とともに劣化するという変化）
2. フィーチャーの間に生じる相互作用による変化（例：建物の火災が隣接する建物へ延焼する場合、隣接建物の火災という変化は、延焼という相互作用で記述される）
3. フィーチャー以外の要因による変化（例：法律が改正され、多くの建物が「既存不適格」となる時、法律の改正はデータベース化の範囲から見て外部要因であり、「既存不適格」となることが外部要因による変化となる。）

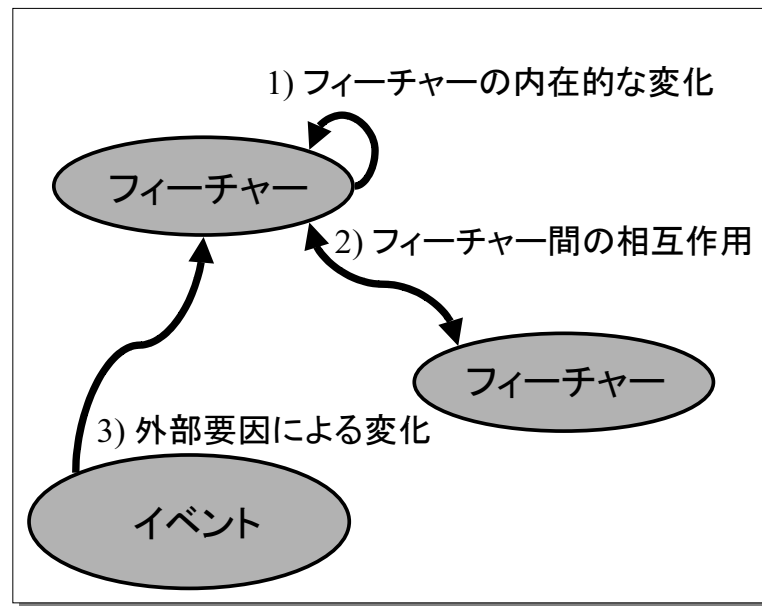


図 3.3: フィーチャーの変化

上記のうち、1、2 に関してはデータベースにとって内在的な変化であり、フィーチャーに変化モデルや相互作用モデルを与えておくことで、表現可能である。3 の外部要因に関しては、フィーチャー・データベースの対象外でありながら、フィーチャーの変化を記述したり、再構築する上で不可欠な情報であることから、フィーチャーとは区別してデータベースに取り込めるようにしておくことが有利である。たとえばフィーチャーを建物とすると変化を引き起こすイベントとしてはたとえば地震、開発事業が考えられる。イベントのふるまいには、図 3.4 に示すように、イベント自身の変化と対象範囲のフィーチャーに変化を与えるインパクトモデルがある。後者はインパクトの対象範囲に対して何らかの方法でインパクトを与えるモデルである。イベントモデル全体の枠組みとその例を表 3.2 に示した。

たとえば地震というイベントを考えると、地震自体は開始・終了や発生地域・期間といった時空間的属性を持ち、同時に余震のように他の地震と何らかの関係（ここでは因果関係）を持つ。そしてふるまいとして、地震動が拡散していくといった物理モデルなどを自身の内生的変化として持ち、たとえば破壊という

方法を伴ったインパクトモデルを持つ。それは建物というフィーチャータ입を対象とし，発生地域・期間をインパクトの及ぶフィーチャー範囲として定義できる。インパクトの方法は，建物の損傷状態というフィーチャー属性を変化させるという関数として定義できる。

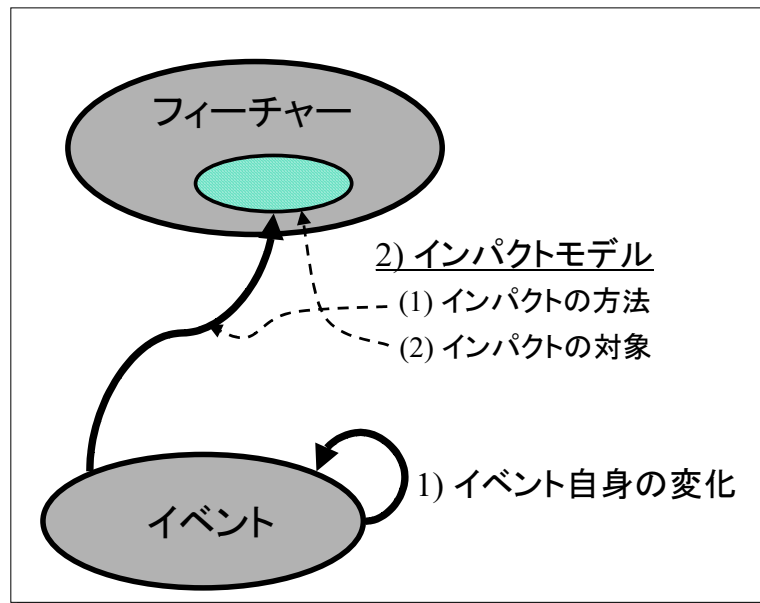


図 3.4: イベントモデル

表 3.2: イベントモデル

項目	内容	例
1. イベントの開始, 終了	イベントの開始時刻・終了時刻	地震動の開始・終了時刻
2. イベントのふるまい	イベント自身の変化と, 地物等へのインパクト	
1) イベント自身の変化	イベント属性の時間的な変化	地震動の時間変化データ
2) イベントモデル	インパクトの内容と対象	
(1) インパクトの方法	下記に定義されるインパクト対象に与えるインパクトの内容	以下の対象フィーチャーに関して, 損傷状態という属性を地震動の大きさと建物の耐震性能に応じて変化させる.
(2) インパクトの対象	インパクトの与えられる対象	
フィーチャー範囲	インパクトの対象となる地物等の空間範囲	地震の発生地域・期間
フィーチャータイプ	地物等のタイプ	建物
フィーチャー関係	地物等の関係	インパクトなし
フィーチャー属性	地物等の属性	損傷状態
3. イベント間の関係	イベント間の因果関係	別途定義された地震と「本震」, 「余震」という関係でリンクされる.
4. イベントの属性	イベントの属性	マグニチュード, 震源までの深さなど

表 3.3: オブザベーションモデル

項目	内容	例		
		高分解能衛星画像	航空写真による課税対象家屋の異動判読	建築確認申請による新築建物の把握
1. オブザベーションの開始・終了	観測の開始・終了時刻	画像撮影時刻	写真撮影時刻	常に継続
2. オブザベーションのふるまい	観測方法、結果（データ）、その精度に関する情報（以下の1）、2）の項目）			
1) オブザベーション自身の変化	観測に関する属性の時間変化(例:観測中のセンサの感度劣化など)	なし	なし	建築基準法の改正などによる申請内容の変化
2) 観測モデル	観測の方法(以下の(1)から(5)に対応)（例：観測中のセンサの感度劣化など）			
(1) サンプリング方法	観測対象（サンプル）の空間的、時間的な範囲と、その決定方法.	撮影時のセンサ位置・姿勢データを用いて記述されたセンサの素子と地表面上の領域（画素のフットプリント）との対応関係.	撮影時のカメラの位置・姿勢データを用いて記述されたフィルム面と地表面との対応関係.（例:共線方程式）	すべての新築建物（定義は建築基準法による）
(2) 観測対象	以下の項目からなる観測対象の定義			
フィーチャー／イベントのタイプ、あるいはインスタンス	観測対象となる地物等やイベントのタイプあるいはインスタンス	上空から「見える」すべての地物等	すべての課税対象家屋	すべての建築物
フィーチャー／イベント関係のタイプ、あるいはインスタンス	観測対象となる地物等間の関係、あるいはイベント間の関係（タイプあるいはインスタンス）	観測せず	観測せず	観測せず
フィーチャー／イベント属性のタイプ、あるいはインスタンス	観測対象となる地物等の属性、あるいはイベントの属性（タイプあるいはインスタンス）	地物等の太陽光の反射光量（センサの検知可能範囲）	変化（新築、減失、増築）と家屋の位置・形状（新築、増築のみ）	観測せず
(3) 観測方法	観測対象と観測データとの関連	地物等からの反射光エネルギーと、センサ出力との関連（大気の透過率、センサ感度特性など）	2 時点の航空写真を判読することにより、家屋の変化を発見する.	建築確認申請の有無・内容・時期と、実際の新築の有無・内容・時期との関連
(4) 観測データ	各サンプルに対応した観測データ	センサの各素子からの出力データ	課税対象家屋のそれぞれに関する変化の有無・内容データ、と位置・形状データ（新築・増築家屋のみ）	個別の確認申請内容
(5) 観測誤差	観測データごとの誤差	上記出力データから再現された地物等の反射光エネルギーと実測値との誤差に関する統計情報	判読誤り（漏れなど）に関する統計情報	建築確認申請の有無・内容・時期と、実際の新築の有無・内容・時期との食い違い
3. オブザベーション間の関係	異なる観測活動間の関連	他の画像との関連（例:ステレオ撮影など）	変化確認のための現地調査と、航空写真判読との関連	なし
4. オブザベーションの属性	観測活動の属性	衛星名や軌道のパス・ロー番号など	判読者の氏名など	確認申請者の氏名、申請の審査担当官指名

3.1.5 フィーチャー、イベントとオブザベーションの相互関係

今までの議論をもとにフィーチャーとイベントとオブザベーションの相互関係をまとめると図 3.1 を拡張した図 3.6 のようになる。また他分野においても、類似した枠組みが存在している事が見出せる。たとえば、制御工学の分野における状態空間表現（図 3.7）では、状態空間を中心として影響を与える外乱と変化を表す状態空間を持つ系とそれを観測する観測器が存在している。すなわち制御の観点から、動的に変化する実世界を記述するアプローチとしての状態空間表現と FEO モデルは共通の構造を有しているといえる。

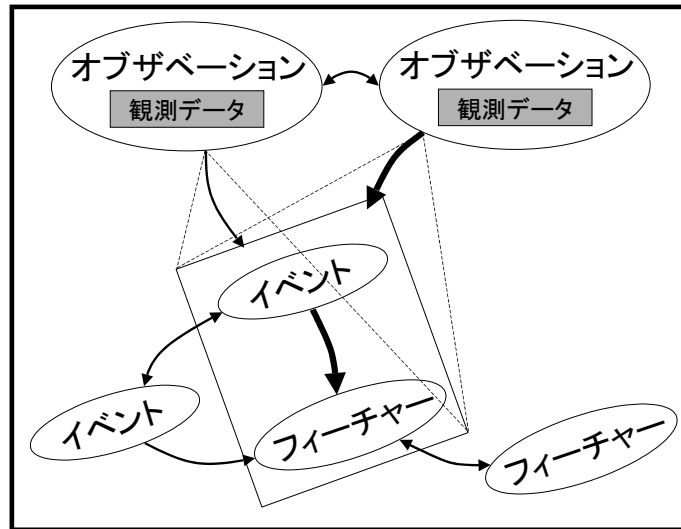


図 3.6: フィーチャーとイベントとオブザベーションの相互関係

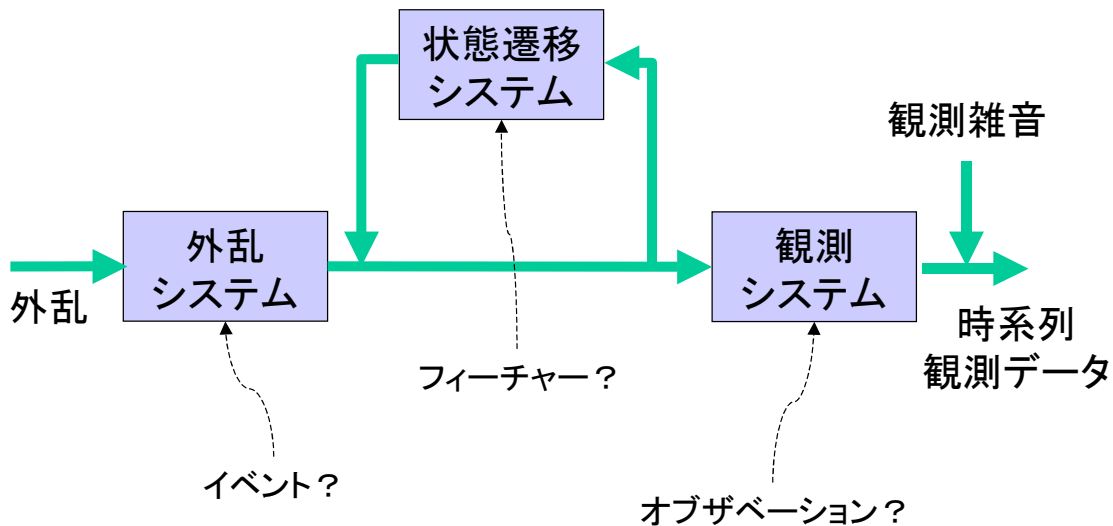


図 3.7: 制御システムの状態空間表現との類似

3.2 FEO モデルに基づく地物等の推定方法の概観

第2章で提案した枠組みに基づいて、地物等の推定を行う必要がある。各分野で様々な推定方法が発展しているものの、それらを統合的に扱えるような概念的なフレームワークは今後の課題である。有効な手法と思われるものとしてたとえば、多様に存在する知識を記号的に処理して情報を抽出するという時間的・空間的推論（たとえば [Sto97] 等多数、また GIS に組織的に取り入れることを試みたものとして NCGIA のプロジェクト [EG98]、不確実性を含んだ推論（たとえば [Con91]）のような AI の分野で主に発展してきた推論技術や、観測値を確率場の実現値の1つとみなし観測値が最も起きやすくなるように推定する最尤法、時々刻々と変化するダイナミックなシステムに対し統計的な処理を施すカルマンフィルタなどがある。特に人工知能システムの実際の応用として様々なセンサやネットワークを通じて大量の生データを統合化することが期待されており、AI における推論技術と統計的推定の接点の重要性は高まっている [麻生 97] といえる。あるいは交通の分野においても従来からの集計データと個別利用者の交通行動を表す非集計データの整合性を取りながら推定することを試みた MPS（Most Probable State）分析などがある [小林 87]。

3.3 FEO モデルの適用例

3.3.1 航空写真と行政情報による課税対象家屋の異動判読

ここでは一つの適用例として、航空写真と行政情報による課税対象家屋の移動判読と開発事業の家屋に与える影響を考察した（図 3.8）。まず、建物は空間的にはポイントとして表現し、時間的には存在期間がピリオドとして表現できる（図上左 2）。それに対し、航空写真計測は空間範囲として面をサンプリングし、時間範囲は一瞬なのでインスタントとしてサンプリングする（図上左 3）。また、建築確認申請のような行政情報は個別の建物について行うので、サンプリング対象範囲はポイントの申請受理建物であり、時間も申請時刻の瞬間である（図上左 4）。航空写真はそのようなサンプリング後に存在の有無の二値判定を行い（図下左 2）、行政情報に関しては、新築時刻等の時刻を計測する（図下左 3）。また開発事業のようなイベントは開発事業地域をサーフェスとして持ち、数ヶ月から数年というピリオドである開発事業期間をもつ。その時空間範囲にその建物が入った場合はその開発事業の影響で建物が立った可能性が高いと判定する（図下左 1）。

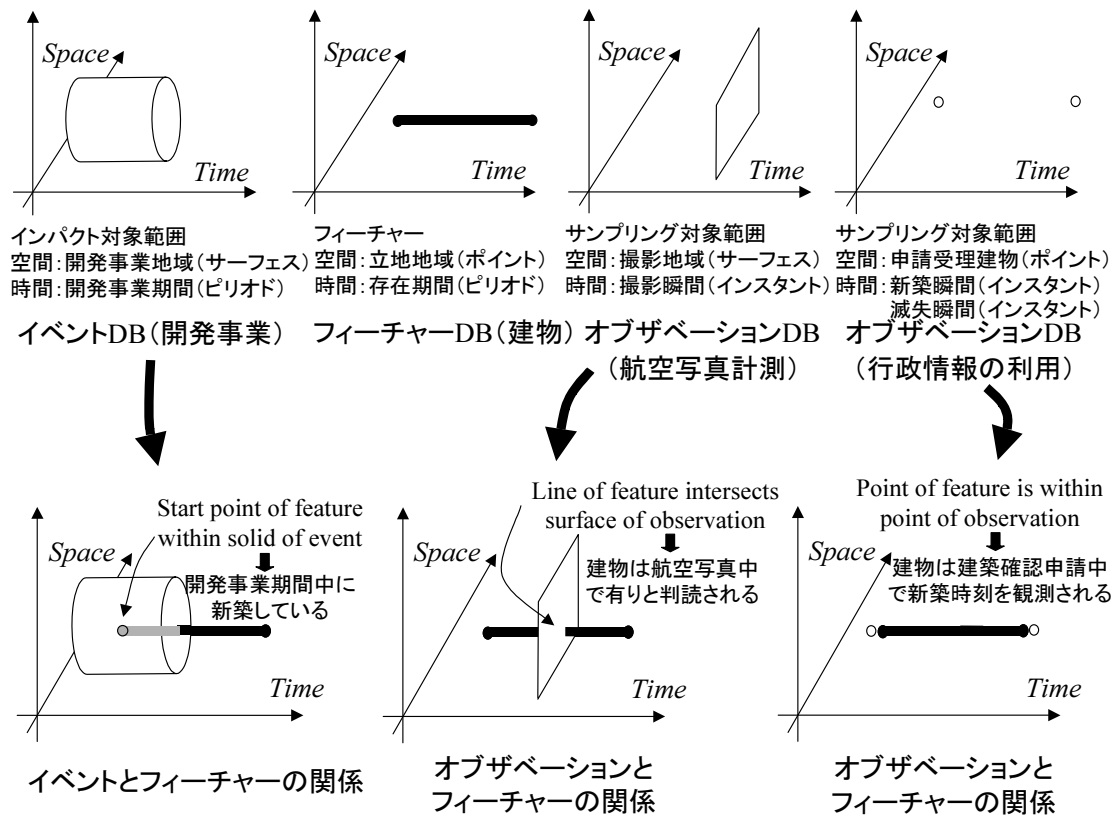


図 3.8: 家屋の移動判読における FEO モデルの適用

第 4 章

地物再構成の基本アルゴリズム

地物の再構成を行う推論型 GIS の世界観については 2 章で説明し、そのための静的な概念モデルは 3 章で扱ってきた。本章では表現された各オブジェクトから知りたいオブジェクトを再構成するアルゴリズムを考察する。具体的には前章の FEO モデルの枠組みと組み合わせることによって、再構成の世界が推定すべき対象地物オブジェクトや、対象地物オブジェクトを観測した観測オブジェクト、対象地物に影響を与えるイベントオブジェクトから構成され、観測データを尤もらしく、かつ構造自体も妥当になるように地物を推定することといえる。4.1 ではまず再構成の方針について、4.2 で具体的なアルゴリズムを述べる。そして 4.3 で再構成された地物の評価を述べ、また 4.4 では再構成を行うシステムの構築について簡単に触れ、最後に 4.5 でシステムを用いて簡単なシミュレーション実験を行う。

4.1 再構成アルゴリズム概要

再構成の概念的な流れは図 4.1 の通りである。たとえば、人間の時空間位置を再現するケースで考えると、まず人間の時空間位置を計測したデータ（GPS データのような非集計データやトラフィックカウンタのような集計データ）と、人間の行動モデルを収集するという、人間に関する様々な情報収集を行う。そして、例えば観測データが GPS データであれば、GPS データに近く、かつなるべく滑らかになるような軌跡を推定するはずである。つまり、GPS データがなるべく尤もらしくなるように、かつ人間はふつうは滑らかに歩くという行動モデルとの両者の間で最適に推定されるべき基準を決定している。その基準のもとで例えば遺伝的アルゴリズムを使うことを決定し、最適解を探索する。またその後求めた解が妥当かどうか検証する。以下では各ステップについて検討する。

関連情報収集

知りたい地物に関連した情報を集めてくることになる。現時点では実装を行っていないものの、FEO モデルのメタデータ中の Observation モデルの対象地物名や Feature の地物名から関連する情報を検索し効率的に情報収集することは可能である。

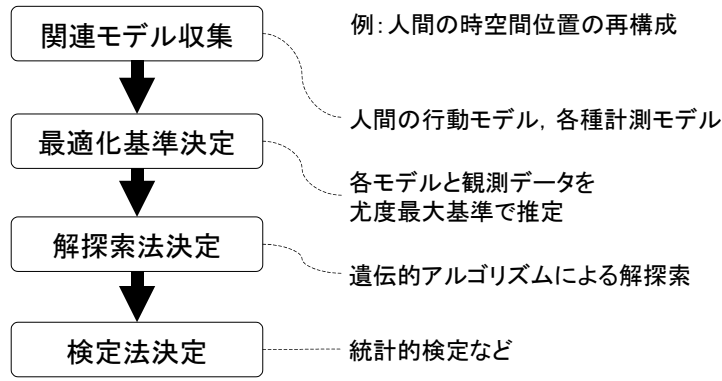


図 4.1: 再構成アルゴリズムの概念フローと人間の時空間位置再現における例

最適化基準決定

最適化基準の決定は理論的よりどころとして重要な所である。本研究では観測データに関してはそれを尤もらしくするように（尤度最大化基準）、また予め分かっている知識や地物モデルに関するデータ等がある場合は事前分布として表現し、それに対応する解の生起確率も高くなるように（事後確率最大化基準）推定する。後者のような推定はベイズ推定と呼ばれるが、とくに事前分布を確率密度関数で描くのが難しい場合（例えば、軌跡の生起確率を確率密度関数で表現するなどは困難である）は、非常に単純にいくつかの値と生起確率の組み合わせを与えた。以下では、定式化について述べ、それをどのようにシステマティックに実現するかの詳細は 4.2.1 で述べる。

まず、地物のある時点の時空間位置は、

$$p_i = (x, y, z, t)^t \quad (4.1)$$

の 4 次元ベクトルであり、ある地物の一連の時空間シーケンスの真値は、

$$\theta = (p_1, p_2, \dots, p_n) \quad (4.2)$$

とできる。

一方、観測データは断片的なので 4 次元以下であり、一観測データは例えば、

$$d_j = (x, y, t)^t \quad (4.3)$$

で表され、ある種類の観測の結果得られたデータ群は、

$$d = (d_1, d_2, \dots, d_n) \quad (4.4)$$

とできる。また観測データの尤度関数（条件付確率） $l(d | \theta)$ は、各観測オブジェクトが持つとする。

地物の知識に基づく解の生起確率は事前確率密度関数 $p(\theta)$ として表されるので、観測データが取得された後の事後確率 $p(\theta | d)$ はベイズの定理より、

$$p(\theta | d) = \frac{p(\theta)l(d | \theta)}{\int p(\theta)l(d | \theta)} \propto p(\theta)l(d | \theta) \quad (4.5)$$

とでき、これを最大化するような真値を求めるので、真値 θ は、

$$\begin{aligned} \hat{\theta} &= \arg \max p(\theta | d) \\ &= \arg \max p(\theta)l(d | \theta) \end{aligned} \quad (4.6)$$

のようになる。すなわち、事前確率密度関数 $p(\theta)$ は各知識オブジェクトが持つとし、尤度関数 $l(d|\theta)$ は各観測オブジェクトが持つとすると、真の時空間位置を求めることができる。

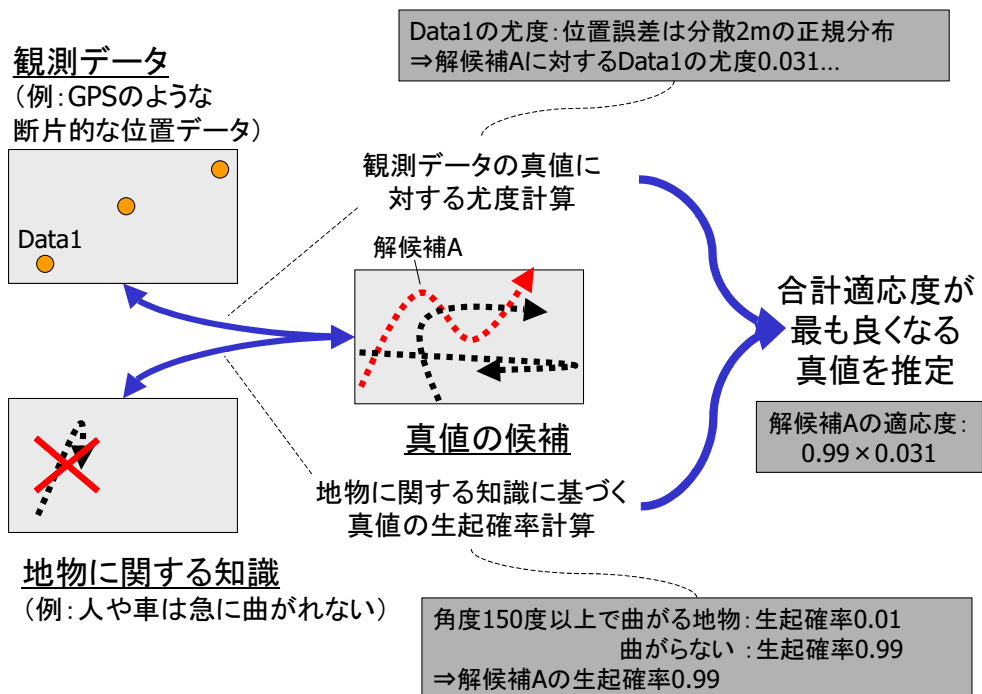


図 4.2: 本研究での最適化基準とその計算例

その具体的な例を図 4.2 で示した。まずある人の軌跡を知りたい時に、解候補の軌跡をいくつか用意し、各観測データの各解候補に対する尤度を計算する。解候補 A に対して断片的な位置データ Data1 の尤度はたとえば位置誤差がある標準偏差の正規分布であった場合、それに応じた尤度を逆に計算することができる。また地物に関する知識として「人は急に曲がれない」というものがあつた場合、それをやや具体的に角度 150 度以上で曲がることある確率 0.01、曲がること決していない確率 0.99 とすると、解候補 A は後者なので生起確率 0.99 ということができ、先ほど求めた尤度と掛け合わせることが可能である。

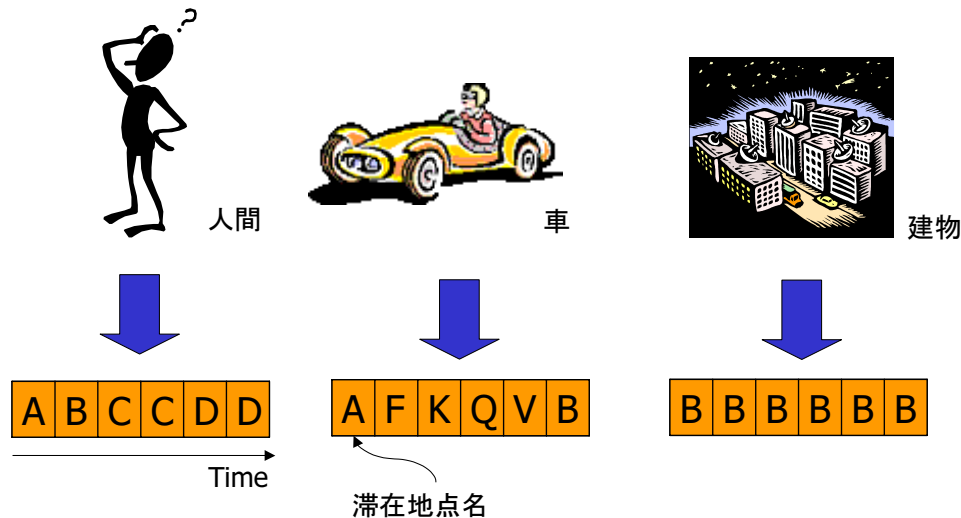
解の探索法決定

解の探索は、問題の中心的課題であるが、本研究では Genetic Algorithm(遺伝的アルゴリズム、以降 GA) に沿った探索を行う。GA は解を表現した個体をいくつかランダムに発生させ、ある定めた基準の評価値で優劣をつけ淘汰を行う。そして個体同士を交叉させる事によって解の正しい部分（ビルディングブロック）を母集団に広めていき、いくつか世代を経ると最適解に収束するという生物進化の原理に着想を得たものである。本研究で GA を選択する理由は、

- 解の表現法がシンプルで汎用性が高い。
- 未知数が多く解空間が広大な場合はとくに、準最適解でもかまわない。

という点が挙げられる。前者に関しては数学的な定式化による場合、データ統合を行う立場の人が全ての式や仮定を把握する必要がある負担が大きく、新しい種類のデータを追加する際には、式自体を改

良するか、データを式の仮定を満たすようなものにしなければならないために、非現実的な仮定にならざるを得ない場合も出てくる。前章の FEO モデルに基づくアプローチの場合、観測オブジェクト側がデータの評価方法、集計方法を提供することになるので負担を軽減できる。さらに、表現方法が配列に基づくものでありシンプルであるために地物そのものの特性を入れやすい（図 4.3）。



地物の時空間位置を遺伝子で表現

図 4.3: 様々な地物の時空間位置を遺伝子で表現

後者に関しては、純粋な最適解法に比べ現実的な選択であるが、いかに広大な解空間内を効率よく、ローカルミニマムに陥らずに探索できるかが重要である。また解の周辺でもなかなか最適解にはたどりつかないので様々な工夫が必要である。GA は Holland に始まり、遺伝子をビット表現するシンプルな遺伝子型から最近では表現型で構造を持つ遺伝子を推定する遺伝的プログラミング [伊庭 99] も始められ、エージェントの学習に利用されることも多い（たとえば [高玉 98] など）。本研究では以下のような一般的な GA の手順に基づき解の探索を行う（図 4.4）。

検証法決定

検証法については求めた最適解そのものの検証と探索に用いた知識の検証である。最適解そのものの検証に関しては、GA が準最適化手法であるために毎回最適解にたどりつける保証はないため何回か繰り返して解を求め評価値の分散を基準にするのが妥当である。また知識の検証に関しては、知識の内容を多少変えたものを対立仮説として用意し尤度を比較する尤度比検定等の適合度検定や、あるいは真偽が不明な事柄をとりあえず真と考えて仮説を立てて推論を進め、矛盾なくうまく与えられた問題が解決できたり説明が達成されれば、立てた仮説は正しかったと考える形式の仮説推論 [石塚 96] などが有効と思われる。

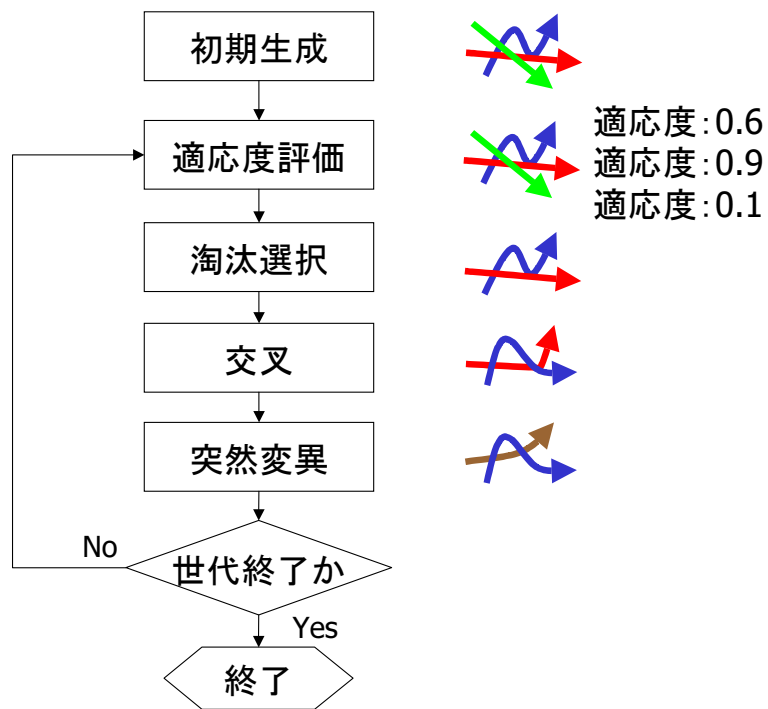


図 4.4: GA を用いた解探索の手順

4.2 再構成アルゴリズム

ここでは具体的に再構成のアルゴリズムを考察する。まず 4.2.1 では参照すべき各オブジェクトの表現について述べ、それから 4.2.2 で解候補の初期生成について、4.2.3 で解候補の評価、最後に最適解の探索法について考察する。

4.2.1 各オブジェクトの表現

再構成する地物オブジェクト

再構成する地物オブジェクトは基本的には前章の Feature 表現にそっている。ただし GA を行い再構成するために遺伝子表現を行う必要がある。時空間位置の遺伝子表現についてはいくつかタイプが考えられるもののここでは、ある時間ごとの存在位置を表現したものを配列上に持つとする（図 4.5）。また時間間隔を表す時間解像度と存在した時間は本質的に異なるものとする。すなわち、図 4.6 のように同じ軌跡でも、下段左は時間解像度=存在時間であり、下段右は時間解像度 >> 存在時間であり、仮に図 4.5 のように遺伝子表現が同じだったとしても、存在時間を明示的に与えることにより、どちらの解釈表現になるのか判別できる必要がある。

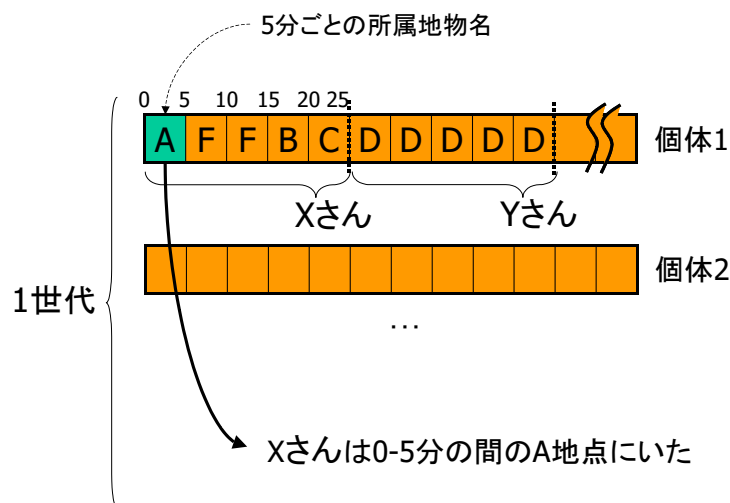


図 4.5: 地物オブジェクトの遺伝子表現（例：人間の時空間位置）

観測オブジェクト

観測データを持つ観測オブジェクトに関しても前章の Observation 表現にそっている。とくに実用上重要な点は、観測時の対象地物の時空間範囲、観測方法を持っていることにより、解候補である遺伝子に対しても擬似観測が可能になる点と観測時の誤差機構をもっているために誤差を持った観測が可能になり、逆に真値と観測値から尤度を計算することも可能となる点である。詳細は 4.2.3 で述べる。

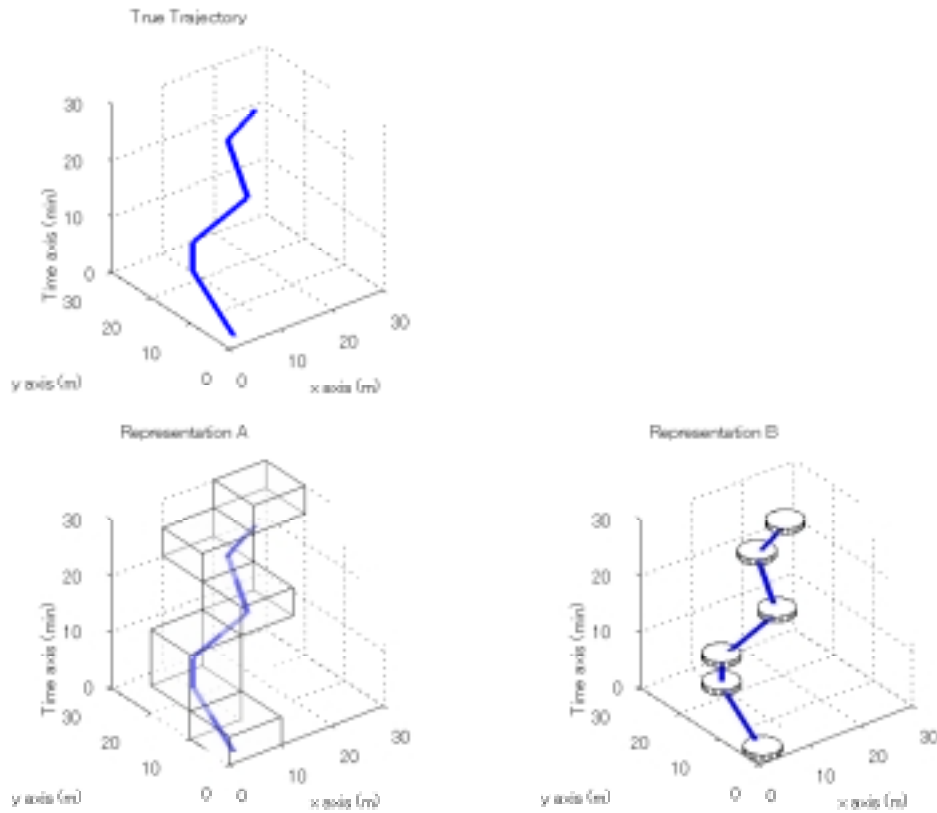


図 4.6: 対応する時空間位置表現（上段：真の軌跡, 下段左：空間範囲がグリッド, 時間範囲が区間として表現した場合, 下段右：空間範囲が小さい半径のエリア, 時間範囲が瞬間として表現した場合）

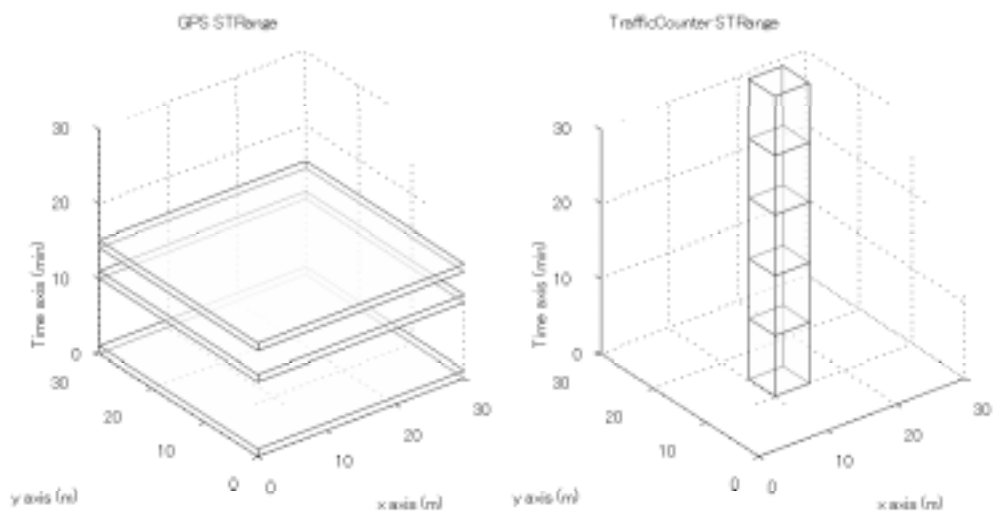


図 4.7: 観測時の時空間範囲（左：GPS, 右：トラフィックカウンタ）

イベントオブジェクト

イベントについても前章の Event 表現にそっており、実用上、インパクト時の対象地物の時空間範囲とインパクト方法を持つ事が重要になるが本研究では時間の都合上、実装を行っていないために深くはふれない。

知識オブジェクト

知識オブジェクトに関しては本研究でいくつかの仮説選択肢をそれぞれの生起確率とセットで持つとした。また本研究では各仮説選択肢は背反であるとしている。すなわち背反でない場合生起確率の合計を 1 にできないためである。たとえば「人は 1 分間で移動できる距離は大体 80m 以内である」という知識の場合、

1. 移動できる距離は必ず 80m 以内である：90%
2. 必ずしもそうではない：10%

とすべきであり、

1. 移動できる距離は必ず 80m 以内である：70%
2. 移動できる距離は必ず 70m 以内である：20%
3. 移動できる距離は必ず 60m 以内である：10%

とはできない。これは選択肢 2,3 が必ず選択肢 1 に包含されるからである。このような場合は

1. 移動できる距離は必ず 70-80m 以内である：49%
2. 移動できる距離は必ず 60-70m 以内である：14%
3. 移動できる距離は必ず 60m 以内である：7%
4. 移動できる距離は必ず 80m 以上である：30%

とする。各知識はこれらの選択肢中から該当するもの自動的に調べることができる機能を持っているとする。

4.2.2 解の初期生成法

解の初期生成法は大きく、

- 解の範囲内でランダムに生成する
- ドメイン知識を利用して生成する

に分けることができる。後者は「良さそうな」初期値を恣意的に与えることになり、グローバルに探索する GA の考え方に反することになるがたいていは真の解の近くに早く収束する。ドメインの知識としてたとえば、「OD が既知である」とか、「移動距離に制約がある」などが挙げられ、解の初期生成に関する議論は次章で述べる。

4.2.3 解の評価

評価アルゴリズムの概要

最適化の中でも評価値は重要な要素であり、それをいかにシステマティックに求めるかは本研究でも非常に重要な部分であり、以下のような流れで行っている。

1. 観測データにあうデータを解候補の時空間表現から取得（擬似観測）
2. 取得した擬似観測データと観測データの尤度を計算
3. 知識オブジェクトから解候補の生起確率計算
4. 生起確率と尤度を掛け合わせた適合度を計算

観測オブジェクトによる解候補遺伝子からの擬似観測

観測データに対応するデータを解候補の時空間表現から取得するために観測オブジェクトが持つ観測時の時空間範囲に基づき擬似観測を行う。図 4.8 の例では、図中左の解候補である、ある人の時空間表現に対し、図中右に表現した GPS のような観測データの観測が持っていた時空間範囲、すなわち電波受信可能空間範囲かつ受信時刻瞬間で擬似観測を行うことによい観測データに対応するデータを得ることができる。しかし、時空間範囲値によっては何も対応するデータが得られないことがあり、そのような場合は観測データを尤度評価することができず反映することが出来ない。そこで地物を部分的に時空間内挿を行う必要が出てくるが、それについては次章で述べる。

擬似観測データに対する観測データの尤度の算出

擬似観測により観測データに対応するデータを解候補から取得できるが、場合によっては複数取得される場合もある。そのような時は集計が必要となり、それも前章の構造化された情報に基づき、各観測固有の集計を行う。たとえば、平均化、合計化、最近隣値選択などが考えられる。そして最後にそれぞれが持つ誤差分布に基づき尤度を出すことが可能である（図 4.9）。

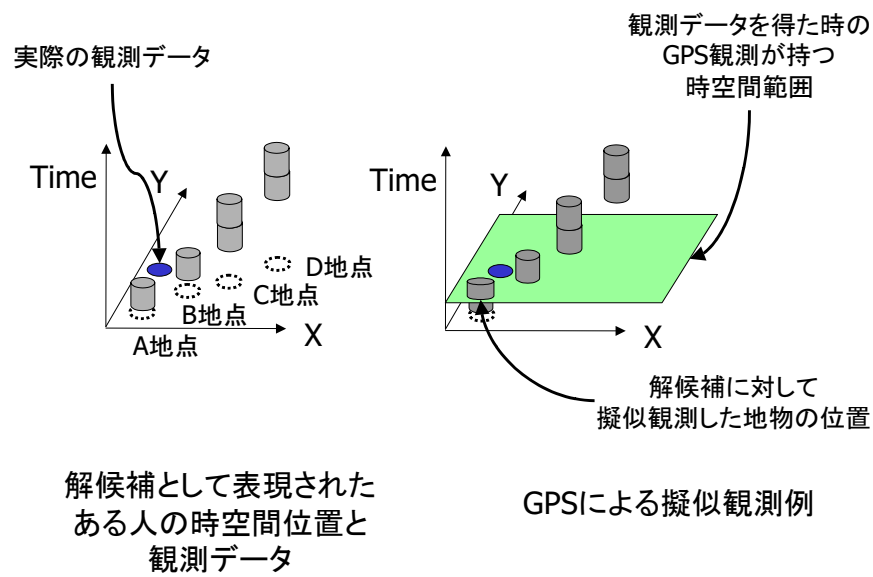


図 4.8: 擬似観測

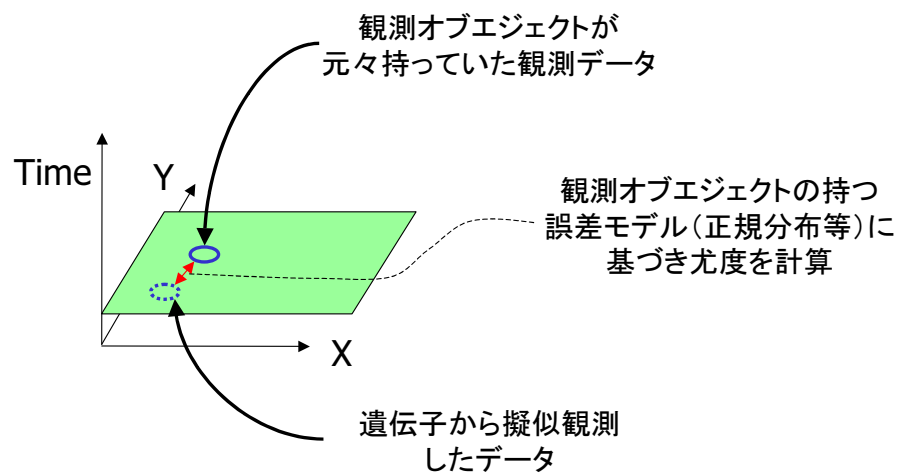


図 4.9: 擬似観測データに対する観測データの尤度算出

知識と解候補遺伝子の適合度算出

解候補の知識に基づく生起確率の算出は4.2.1で述べた通りであり、解候補の時空間要素からどの仮説選択肢を属するかを各知識ごとに実装したメソッドで判定することにより自身の生起確率を算出する。

4.2.4 GA を用いた最適解の探索方法

一般的な GA のオペレーション

一般的な GA のオペレーションに関しては本研究では経験的に以下の方法で行っている。

淘汰 評価値に対してべき乗スケーリングを行い適応度を算出し、それに比例する選択確率を与える適応度比例戦略（ルーレットモデル）を行う。

交叉 淘汰により与えられた選択確率に応じて遺伝子を交換し、特に断りがない限り一点で遺伝子交換を行う一点交叉とする。

突然変異 個体中の各遺伝子がある確率で変異し、その変異率を 0.05 程度とする。

解を改善する方法

上記のオペレーションのみだと、交叉と突然変異のみで解の改善が行われるので最適解周辺には近づくものの、そこから最適解に近づくのが困難なために、評価値の改善値に応じて確率的に置換する SA 法や、解空間を探索し見つけた最良値で置換する HC 法なども用いる（図 4.10）。本研究では、いくつかの点で設定可能である。

- 置換を行う世代：たとえば、毎世代、10 世代に一回、世代の後半のみ、など
- 置換を行う個体：たとえば、エリート（最優秀個体）のみ、全個体
- 置換を行う遺伝子：たとえば、ランダムに選んだ遺伝子位置、全ての遺伝子を一箇所ずつ置換し最も改善された遺伝子、など
- 置換を行う範囲：全範囲、解の周辺範囲、など

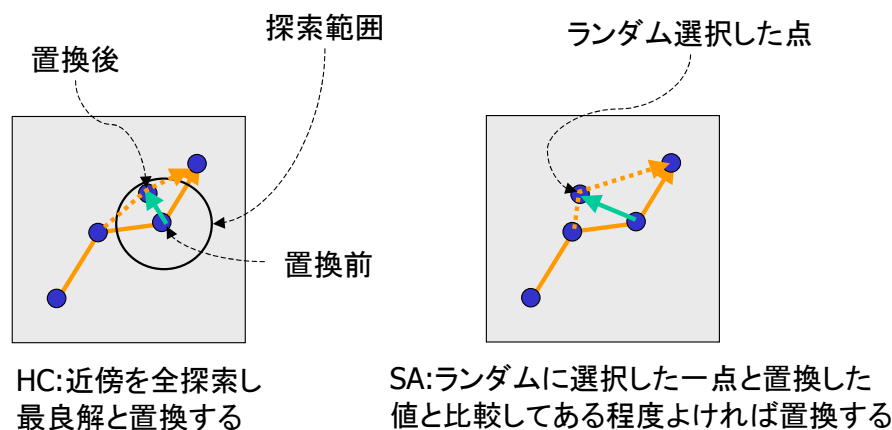


図 4.10: 解を改善する方法

4.3 再構成した解の評価

最終的に GA による最適化で得られた解を評価する必要がある。尤度は観測データ数等の観測条件が変化すると値が変わってしまうので、異なる観測条件での比較評価指標としては使えないために他の指標でなければならない。

4.3.1 真値と非集計的に比較評価する場合

真値が存在しており、かつ地物 ID が分かっている場合には非集計的に比較可能である。例えば、

- 一定時間ごとの位置ずれの平均値（例：平均 5.3m など）
- 所属する時空間ブロックの一致度（例：一致度 0.71 など）

などである。

4.3.2 真値と集計的に比較評価する場合

あるいは、地物 ID は分からない、対応が見つからない場合やそもそも集計量しか興味がない場合は、集計的に比較すればよい。例えば、

- 時空間ブロックに所属する人数の比較（例：平均人数ずれ 3.5 人など）

が可能である。

4.3.3 真値がない場合

真値がない場合は仕方ないので、何回か再構成を行い、分散等の解の求まり方を示す統計量から評価、あるいは尤度比検定などで評価することが可能である。

4.4 システムの構築

本研究では今まで述べてきたような、FEO モデルに基づく再構成の枠組みを実現するためのシステムを構築し今後の数値実験に備えた。システムの詳細は付録 B で述べる事とし、ここではシステムの提供する機能と設計の概略にふれる。

4.4.1 システムの提供する機能

システムの機能として、主に

1. 地物の観測シミュレーション機能
2. GA を用いた様々なデータからの地物の時空間位置の再構成機能
3. 可視化機能—再構成結果画像自動生成機能、地物の時空間位置のアニメーション表示機能

を提供している。

4.4.2 システムの設計

実際のシステム構築は、以下のような設計で行った (図 4.11)。まず実世界に存在する知りたい地物とそれを観測するもの、影響を与えるイベントのクラス設計を行う。その際、空間的、時間的な幾何構造あるいは位相構造に関しては TC211 に則って作成した GFM パッケージ (General Feature Model から命名) をインポートし、必要なクラスのオブジェクトを属性として持つようにする。たとえば、GPSTracker クラスが時間範囲を表現する時はほとんど瞬間なので `TM_Instant`、空間範囲が 2 次元であれば電波受信可能なエリアを表す面としての `GM_Surface` などがある。

それからシミュレーション実験を行う時には真値に対し擬似的な観測を行い、観測データを得る。シミュレーションではない本当の実験データがある時にはそれらの過程は必要ない。そしていよいよ再構成する際には関連データを収集し、必要な地物クラス、観測クラス等を取得しオブジェクトを構築する。そして必要であれば随時 Knowledge オブジェクトを参照しつつ、知識や観測データ等になるべく適合するように、GA で遺伝子表現された地物を淘汰していき、最適な再構成地物を得る。

観測クラスに関しては、観測者自身がインターフェイスに沿った独自の観測クラスを設計してもよいし、予め統合者側がテンプレートの与えた GPSTracker などを使ってもよい。

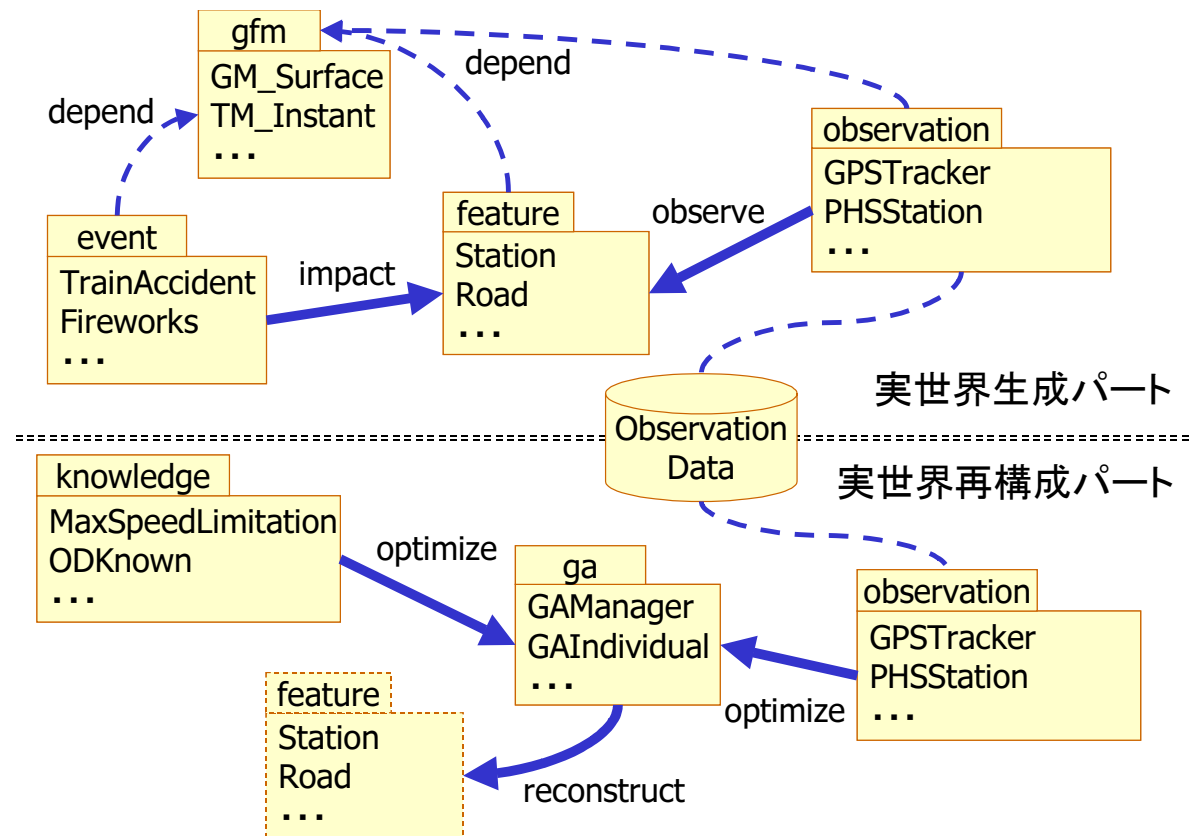


図 4.11: システム概要図

4.5 数値実験例

本節では、以上の再構成の手順に基づき、一人の時空間位置を求めるという非常にシンプルなシミュレーション実験を行う。これは次章以降の実験の第一歩となるものである。

4.5.1 使用データ

ここでは、本研究で実際に実験を行った展示会会場のデータをそのまま用い、そこでのブースをまわる人の動きをシミュレートした真値データや観測データを用意した。実験の共通な諸元は表 4.1 にまとめた。観測データは GPS 非集計データをベースにしたもので、GPS データが得られる時間間隔が粗くなった場合でも他の集計観測データや人間の行動モデル等の知識で補えるかどうか調べた。各知識に関する詳細な説

表 4.1: 実験共通諸元

エリア	60m 四方の展示会場
再構成時間	1 分間隔で 10 分間
空間表現	1m メッシュ
時間表現	1 分間隔
観測データ 1	トラフィックカウンター（6 箇所固定, 実験 3 のみ 1 分ごと計測）
観測データ 2	GPS（空間誤差：標準偏差 2m の正規分布）
非集計精度評価法	1 分ごとの位置ずれの平均
遺伝子個体数	200
世代数	200
実験回数	各 10 回

明は次章で述べることとし、ここでは割愛する。

4.5.2 結果

表 4.2: 実験条件と再構成精度

実験名	観測データ	利用知識	計算時間	平均精度	最良精度	精度分散
実験 1	GPS(1 分おき)	なし	41s	3.8m	3.8m	0m
実験 2	GPS(3 分おき)	起点のみ既知	20s	14.6m	9.9m	0.76m
実験 3	GPS(3 分おき), トラフィックカウンター（1 分おき）6 箇所	起終点既知, 分速 25m 以下, 歩行角度 120 度以内, 壁を通過しない	1358s	13.4m	6.2m	1.60m

実験 1 は GPS が 1 分ごとに得られる「恵まれた」ケースであり、当然ながら GPS データの場所を通過するのが最も尤もらしく真値に非常に近く再現される（図 4.13）。しかし実験 2 のように GPS データが粗

くなると GPS データがない時間の位置は全くわからなくなってしまう (図 4.15)。そこで、トラフィックカウンターを 6 箇所配置して、通ったかどうかのデータを取った。そのような観測データに加え、起終点に関する情報や室内における歩行速度が分速 25m 以下 (ここではぶらぶら周りを見ながら歩いている状況を想定しているのでそれほど早くはない。)、急激には曲がらない、また壁を通過しないなどの条件を追加すると、真値に近い解が求まる (図 4.17)。また計算時間に関しては、実験 1,2 はデータが GPS のみなので非常に短く、実験 3 はトラフィックカウンター 6 箇所分と知識データがあるために時間がかかっているが精度を向上させるためには仕方ないといえよう。このように、本章で述べてきた枠組みにより、非集計データがなくても他の種類のデータと組み合わせることにより、時空間位置が再現可能なことを見てきた。しかし、観測データのタイプや使用知識にも様々なものがあり、組み込むことによる精度の向上度合いは千差万別である。さらにこれはあくまで 1 人の例であり、求めるべき人数が増えたとともに計算時間、精度ともに急激に悪化する。また会場の空間的性質にも精度は左右されやすい。従って、精度や計算効率向上のためには様々な工夫を行う必要があり、次章でふれていくこととする。

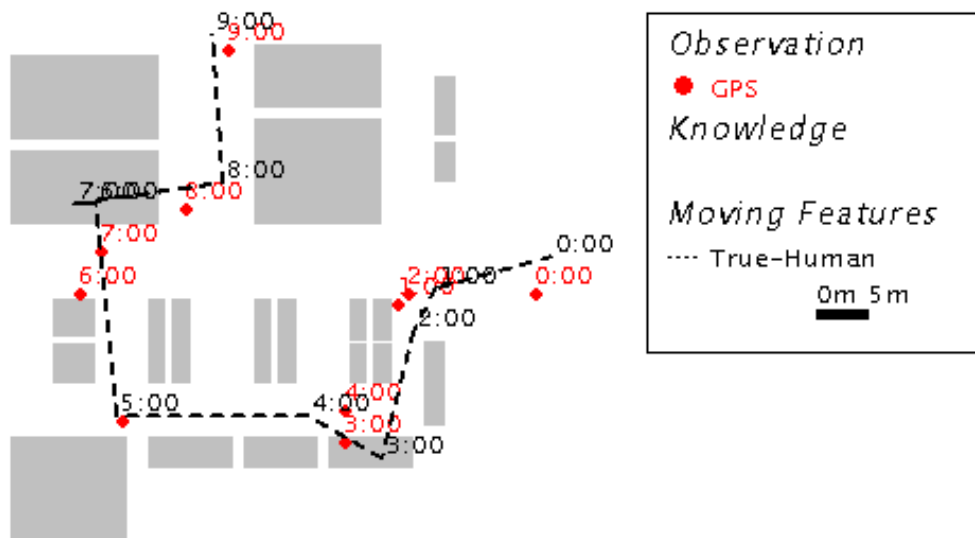


図 4.12: 真の軌跡と 1 分ごとに得られた GPS データ

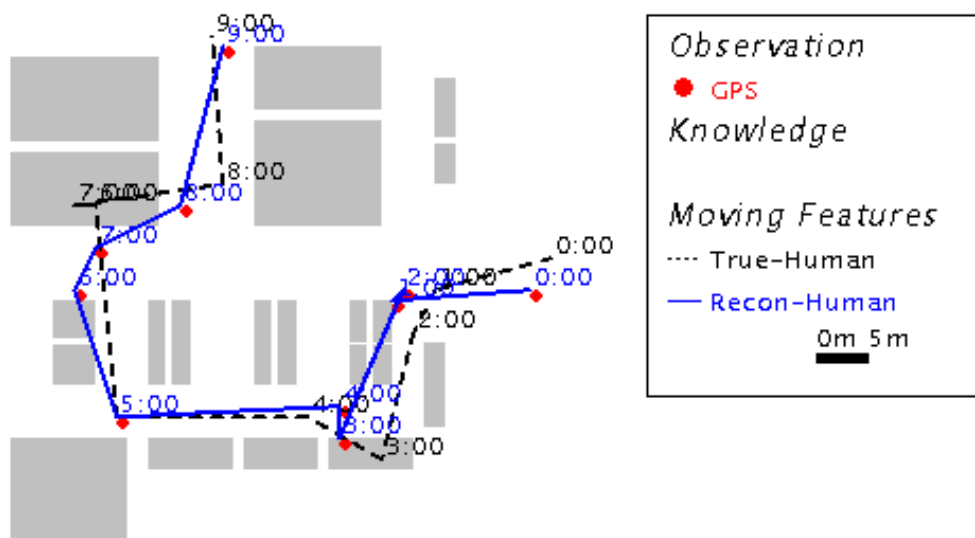


図 4.13: 再構成した軌跡との比較

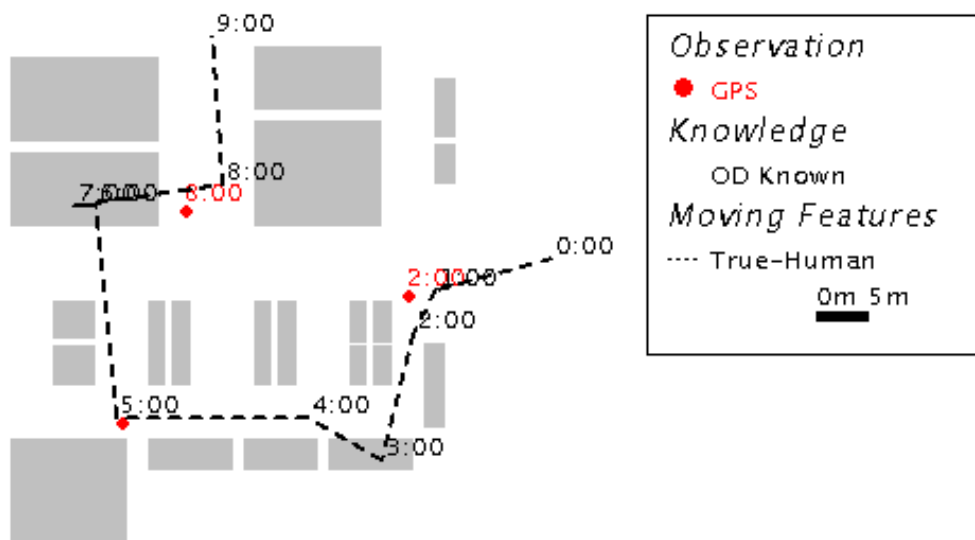


図 4.14: 真の軌跡と 3 分ごとに得られた GPS データ

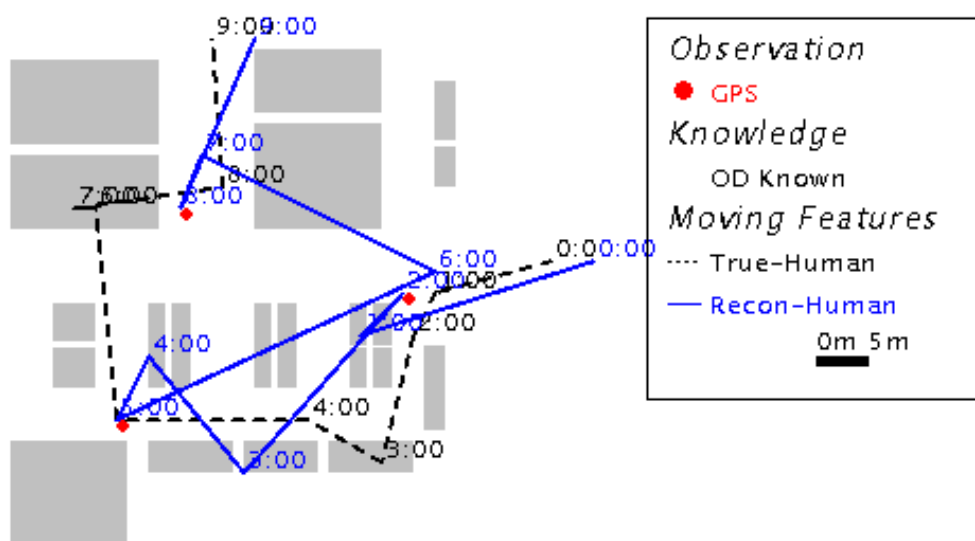


図 4.15: 再構成した軌跡との比較

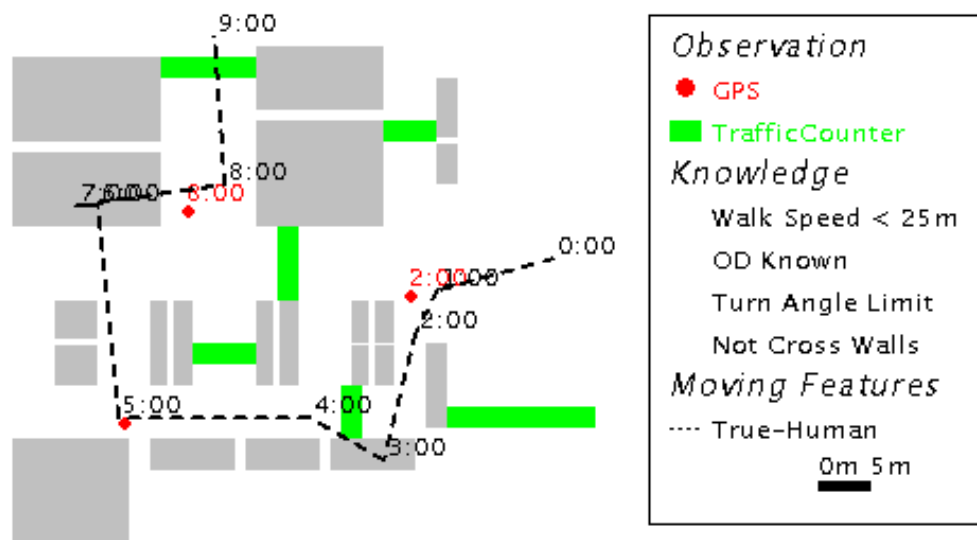


図 4.16: 真の軌跡と 3 分ごとに得られた GPS データと 6 箇所に配置したトラフィックカウンタ

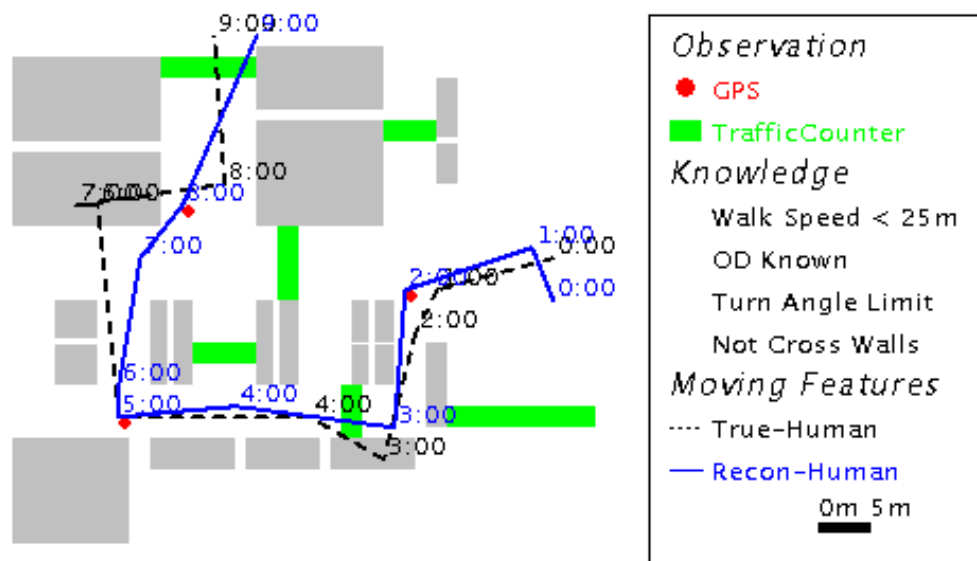


図 4.17: 再構成した軌跡との比較

第 5 章

再構成の精度向上と計算時間の効率化

前章で地物の再構成に関するアルゴリズムを提案したものの、精度、効率ともに改善の余地がかなりあった。そこで本章ではこれらの改善を目指す。図 5.1 は本研究の再構成までの流れを階層化し、各階層での検討事項を列挙したものである。まず上位階層では知りたい地物とそれに関する様々な情報があり、それから再構成の問題にマッピングする必要がある、そこでの検討事項は再構成時に用いる地物の表現法、観測の表現法、地物に関する知識の表現法である。次に GA による最適化問題マッピングする際には個体数、世代数、遺伝子表現法、あるいは初期生成や交叉方法などの検討が必要である。また最後に計算機による処理段階になっても、高速環境の選定や分散環境の構築などの検討が可能である。本章ではそれらを順次述べていくこととする。

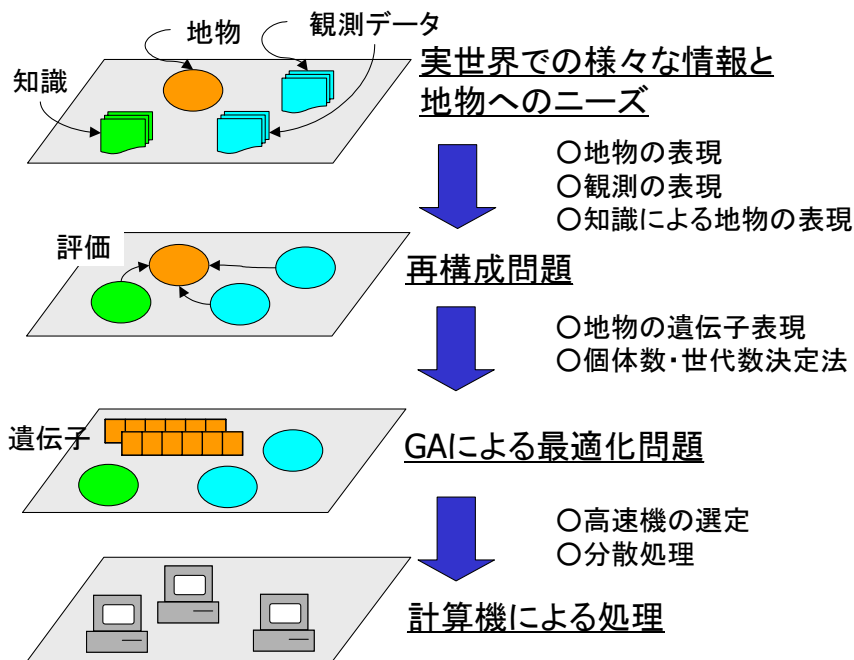


図 5.1: 各ステップでの改善方法

5.1 再構成問題にマッピングする際の精度・効率向上方法

5.1.1 地物の表現の工夫

ここでは地物の表現方法について考察し、いくつかの分類の軸を与え、各問題に応じて効率的な表現を選択できることとする。時間の都合上全てについて比較実験を行うことはできなかったが、自由空間型とネットワーク空間型については数値実験により比較を行った。

ラグランジェ型とオイラー型

まず、個体を追従してその動きを記述したラグランジェ型と、場に基づく量として個体の通過時刻や滞在人数などを記述したオイラー型に分類可能である。一般的には個々の特質を反映しやすいラグランジェ型を用いることが多いが、個々の時空間位置を再構成する必要がなく例えば空間メッシュごとの滞在人数の時間変化を求めるといった、大規模な集計量を再構成したいときは後者の方が有効である。

時間ラスター型と時間ベクター型

また、時間表現をラスターとベクターに分けることが可能である。ラスター型は定期的に位置を記録するものであり、ベクター型はある条件を満たす時の時間を記録するものであり、例えば起終点通過時刻の記録などである。データのサイズが一定という意味では前者の方が処理がしやすいものの、あまりに冗長である場合などは後者の方が直接的で分かりやすい。

自由空間型とネットワーク空間型

さらに、空間表現をどこも自由に移動できるとした自由空間型と、ネットワークのリンク上のみしか移動できないとしたネットワーク空間型に分類することが可能である。前者はどの空間同士も移動可能としているので表現の自由度は高いが、逆に解空間が広すぎてローカルミニマムに陥ってしまうことがある。すなわちあり得ない空間同士を移動していてもよいとしているケースがあり得るということである。また逆にネットワーク空間型は評価する時に必ずネットワークに添った形で内挿をしないとけないので時間がかかってしまうという欠点があるもののネットワークデータにより解空間を制限しているので精度はある程度向上することが期待され、都市圏全体での移動のような対象空間が広いものの行動経路が道路・鉄道等にかなり限られる場合には非常に有効である。

ここでは具体的な比較実験として、前章で用いた展示場内での人の時空間位置の再構成する問題で、グリッド上に解候補を用意していたものに対して、展示場内の簡単なネットワークデータを用意し、それに基づいた再構成を行い、計算時間と精度の面から比較を行った。ネットワークデータは各ブースごと 1,2 ノードとり、通路も適当な間隔ごとにノードをとり 100 ノード程度で構成した。

この実験では自由空間型は 60m 四方に 1m メッシュでグリッドを用意した場合（ノード数 3600）、また 3m メッシュでグリッドを用意した場合（ノード数 400）と、ネットワーク空間型でノード数 100 個用意した場合で 10 人の時空間位置の再構成に関する比較を行った。結果としてはネットワーク空間型の方が精度は上がる。計算時間は 3m メッシュの場合よりはおおくなるものの 1m メッシュよりはかなり早くなったと

表 5.1: 自由空間型とネットワーク空間型の比較

空間表現	計算時間	精度
自由空間型 (1m メッシュ : 3600 グリッド)	17.1 時間	5.5m
自由空間型 (3m メッシュ : 400 グリッド)	4.1 時間	5.5m
ネットワーク空間型 (100 ノード)	9.5 時間	4.9m

いえる。

最後に今まで述べてきた地物の表現の分類に従い、比較整理したものを図 5.2 にまとめた。

	空間 時間	自由空間型	ネットワーク制約型
オイラー	ラスター	例: 10分ごとの人数を記録 0:00 → 0:10	0:00 → 0:10
	ベクター	例: ある場所で10人を超えた時刻を記録 0:00 → 0:54	0:00 → 0:54
ラグランジェ	ラスター	例: 10分ごとのAさんの滞在場所を記録 0:00 → 0:10	0:00 → 0:10
	ベクター	例: Aさんの出発到着時刻を記録 0:00 → 0:54	0:00 → 0:54

図 5.2: 地物表現の比較

5.1.2 観測の表現の工夫

擬似観測時の内挿

擬似観測時に観測データに対応するデータがうまく見つからないこともあり得ることを前章で少し述べた。ここではトラフィックカウンターの例でもう一度考察する。図 5.3 で示すように、6 分、7 分である所にいることが分かっているが滞在時間をほぼ一瞬と仮定している場合にはトラフィックカウンターの観測時刻 6 分 20 秒から 6 分 40 秒の時に、カウンターを通過したかどうかは擬似観測時にわからない。わからない場合は観測データに対応するデータが見つからないので評価もしないという方針で行っているものの、それは観測データを反映させることが出来ないのではやもったいない。そこで地物を部分的に時空間内挿を行うことにより初めて擬似観測が可能となる。

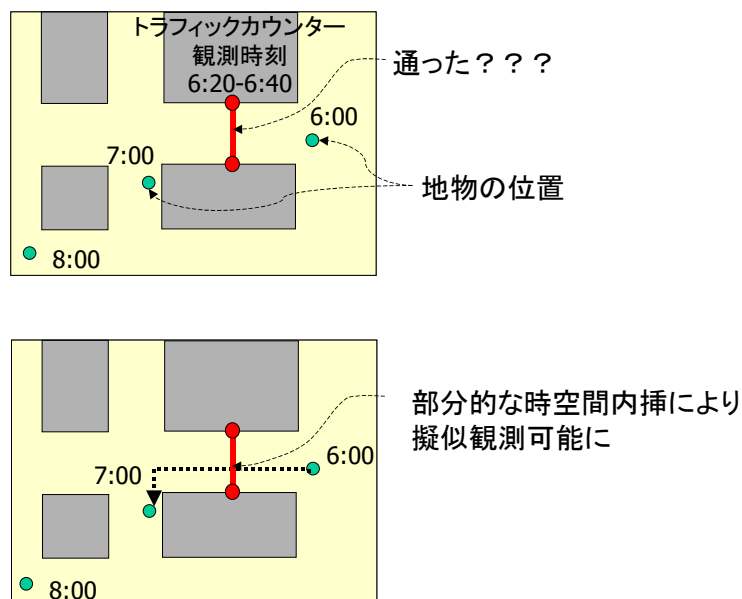


図 5.3: 内挿により可能になるサンプリング

内挿の仕方にも当然いくつか考えられ、図 5.4 にあげた。シンプルな直線内挿もあり得るし、あるいはネットワーク情報がある場合は最短経路を求めそれから内挿図形を得ることもできる。直線内挿では壁がある場合は突き抜けて内挿することになり不自然ではあるものの、そのような解は後述の空間制約で淘汰されることを考慮すればそれほど問題はない。また、確率的に経路を生成し、内挿する方法もあり、コストがかかるものの、図のように迂回している可能性も考慮できるというメリットがある。

ここの数値実験では直線内挿を行い、内挿しなかった場合と比較をした。思ったほど内挿の計算コストはかからず、時間はほとんど変わらず、かなりの精度向上が見られた(表 5.2)。実際に結果の図 5.6 では内挿しなかった場合、会場右下のトラフィックカウンタを本来は通過していないのに通過してしまっている、という問題が起きてしまうため、やはり内挿は必須の技術といえることができる。また内挿をある程度効果的に行える時には逆に時間間隔を広く設定することにより、計算時間を短縮するというメリットも出てくる。

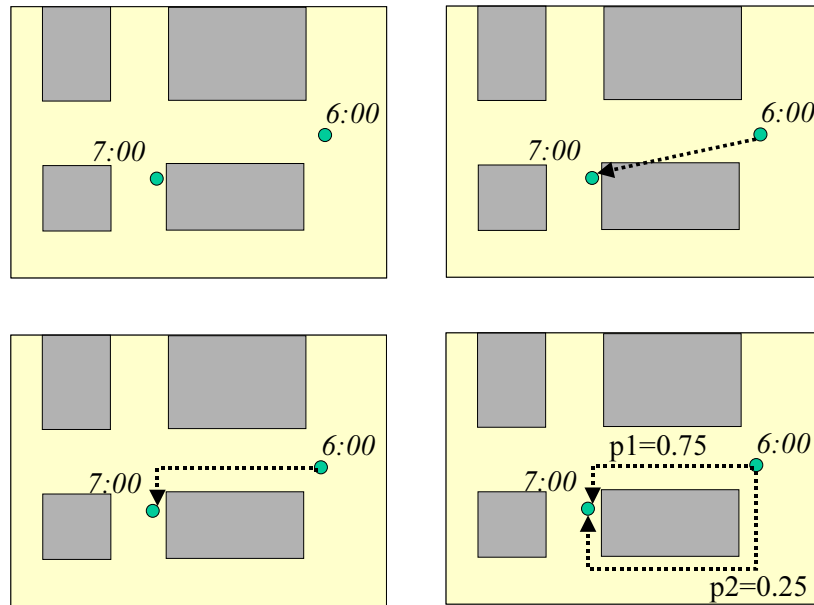


図 5.4: 時空間内挿のタイプ（左上：内挿なし，右上：直線内挿，左下：最短経路内挿，右下：確率的経路選択内挿

表 5.2: 時空間内挿によるサンプリング精度の比較（個体数 200，世代数 200）

観測オブジェクト	内挿方法	実際の計算時間	再構成精度
GPS+TC	内挿なし	724s	8.2m
	直線内挿	628s	5.2m

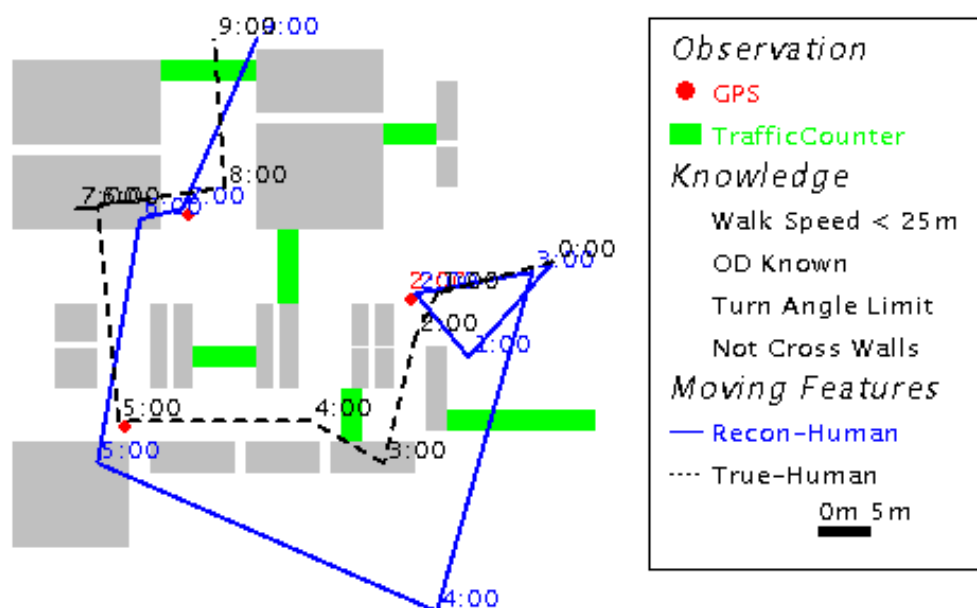


図 5.5: 内挿しないことによる精度の悪化

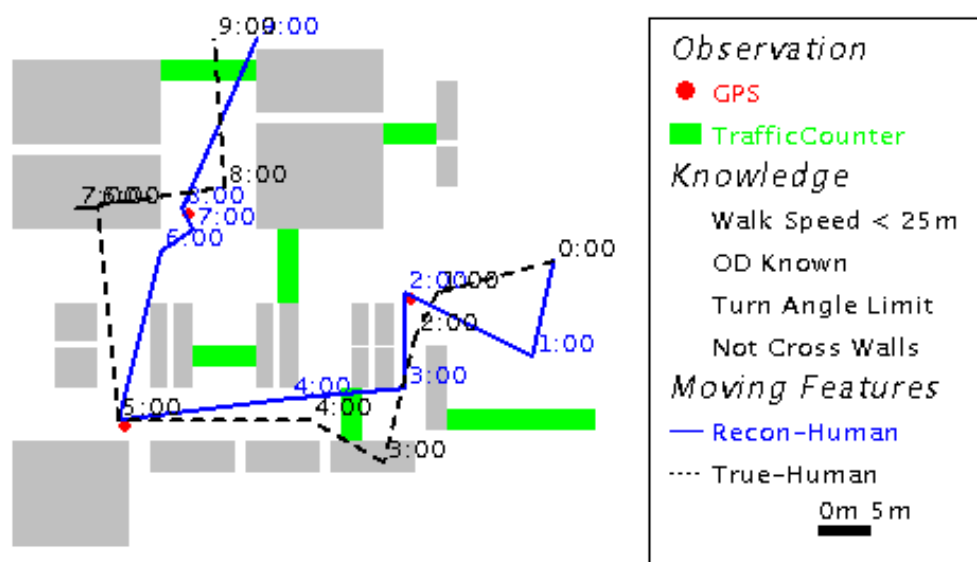


図 5.6: 内挿による精度の向上

誤差タイプの仮定

誤差モデルにどのようなものを選択するのかが重要な問題であるものの実際には細かい誤差分布については知識がないことが多い。たとえば、ある非集計データは、取った場所ははっきり点として取得できるものの系統誤差がかなりあるかもしれない場合、どのように考えるのが適当だろうか。もちろん系統誤差と分散等を未知数にした正規分布などを考慮するのが一つの方法だが、系統誤差や分散が空間や時間あるいはデバイスによって非常に不均一な場合、適切に求めるのは困難である。とくに電波を使って測位するデバイスを建物内で使用するときなどは局地的な空間状況にかなり依存する。それら誤差に関する未知数を第一に求めたいわけではない時、できるだけシンプルな仮定を置いておきたい。たとえば数 m 四方の等生起確率分布などでも良い。

以下の実験は GPS の空間誤差がそれほど大きくなかった場合（2m 程度）と大きかった場合（10m 程度）について、正規分布と等生起分布の誤差分布を仮定し再現の比較を行った（表 5.3）。

誤差が小さい場合は正規分布の方が精度は良かったものの（最良値は等生起確率分布の方が良かったのが分散が非常に大きく不安定な解であった）、誤差が大きい場合は等生起分布の方が逆に平均精度、最良値、分散ともに良くなった。たとえば 2 分の時の GPS データがブースの反対側に来てしまっているが、正規分布では GPS データの方によってしまうために違う経路をとるが、等生起分布の場合は、GPS データ位置に対してある範囲内であればどこでも同じであるためにブースの壁をさえぎるコストを恐れて経路を間違えることはない（図 5.9, 図 5.10）。

表 5.3: 空間誤差分布の設定による再現精度比較

実験条件（時間範囲／誤差分布）	平均精度	最良値	分散
誤差がそれほど大きくない時（2m 程度）			
0.01 分／正規分布（分散 2m）	7.4m	4.9m	0.80m
0.01 分／等生起分布（10m 四方）	9.3m	3.1m	1.33m
誤差がかなり大きい時（10m 程度）			
0.01 分／正規分布（分散 2m）	10.2m	5.8m	1.27m
0.01 分／等生起分布（10m 四方）	7.4m	5.2m	0.55m
実験環境			
各実験は 10 回行った			
個体数 200, 世代数 200			
解候補は間引いたもの			
ターン角度に関する制約あり（120 度）			

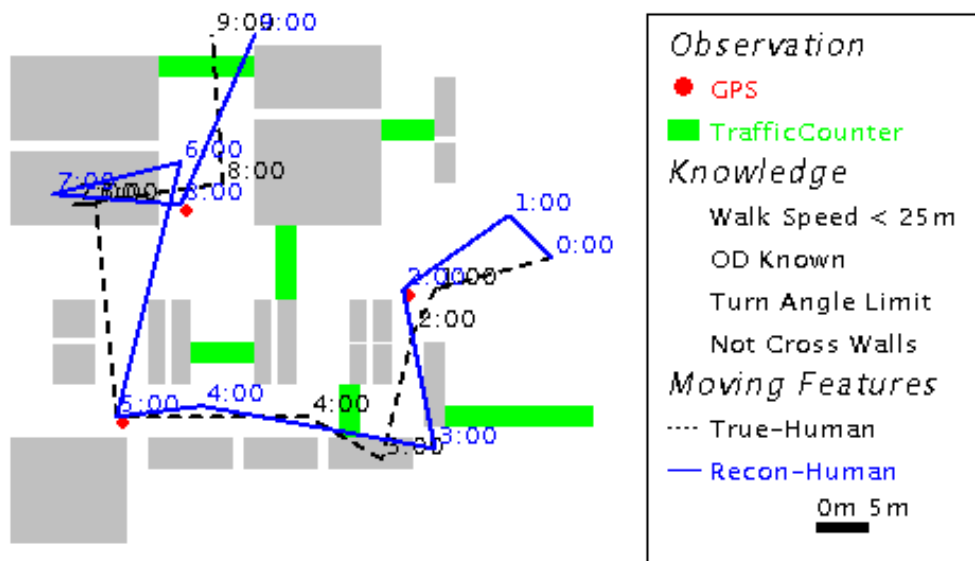


図 5.7: GPS 誤差分布に正規分布を仮定した場合（誤差：小）

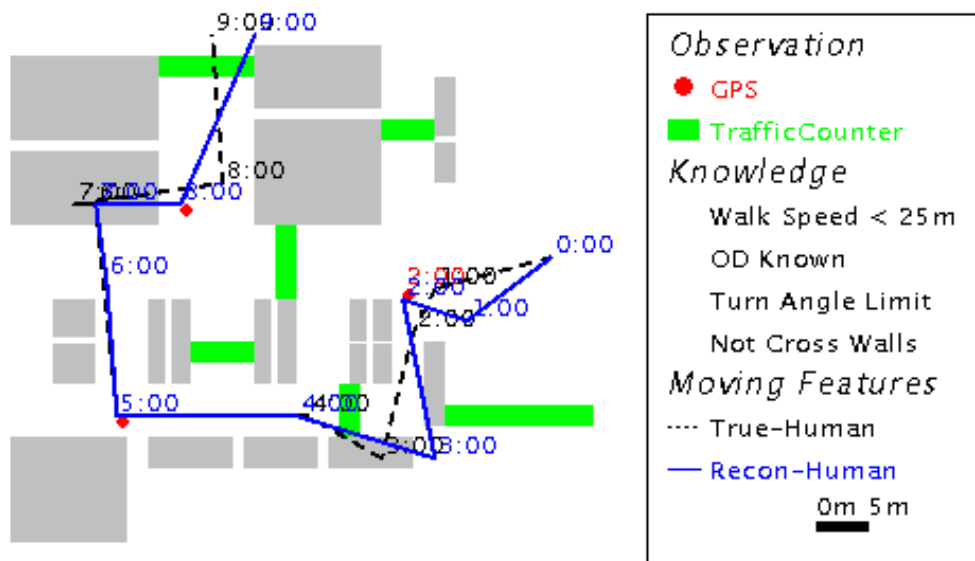


図 5.8: GPS 誤差分布に等生起確率分布を仮定した場合（誤差：小）

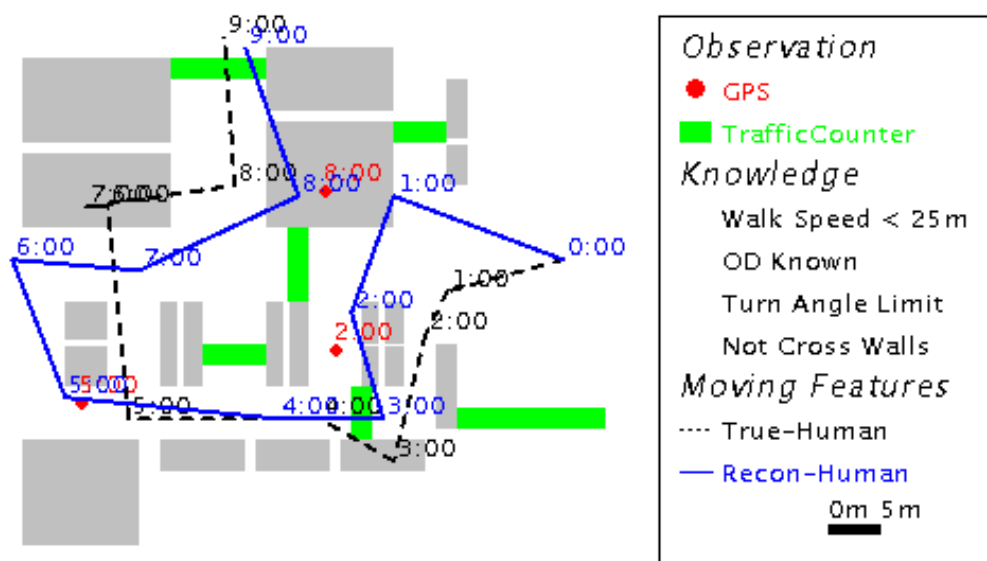


図 5.9: GPS 誤差分布に正規分布を仮定した場合（誤差：大）

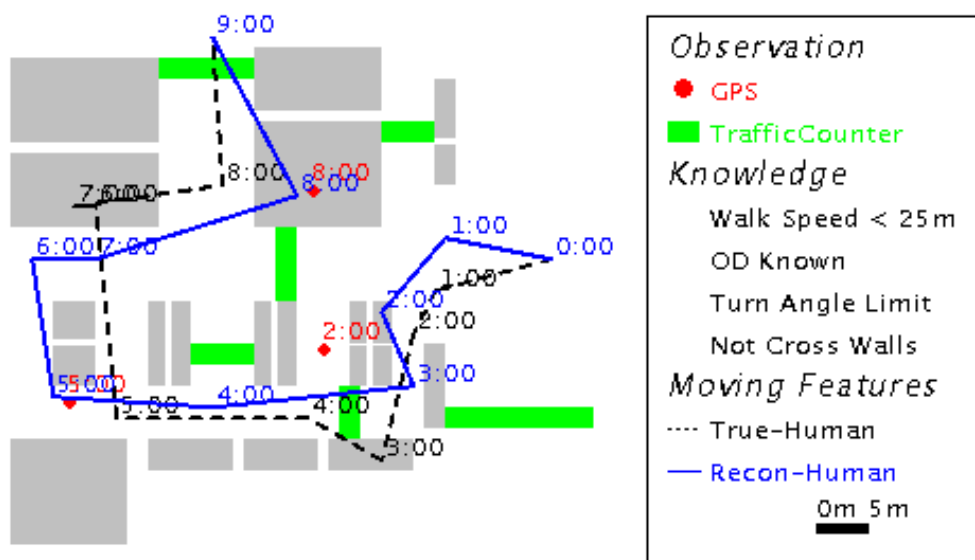


図 5.10: GPS 誤差分布に等生起確率分布を仮定した場合（誤差：大）

その他

本研究では時間の都合上行うことができなかったものの、

- 観測オブジェクト数と精度，計算時間との関係
- 時空間範囲の設定の違いによる精度，計算時間の関係

などについても調べてみるのが重要であり，今後の課題である。

5.1.3 知識による地物の表現

最後に、知識による地物の表現についての検討を行う。まず以下では有効と思われるいくつかの知識を適用した場合としない場合でどの程度の計算時間と精度のトレードオフがあったかを確かめた。また最後に知識においても分類を試み、今後の体系的な知識の効率的な利用の足がかりとした。

移動距離制約

移動距離制約は確実性の高い制約である。会場内であれば全ての人が徒歩なので制約は求めやすい。それではどれくらいの制約をかけるのが一番適当であろうか。以下はそれを確かめる実験であり、制約移動距離を分速で5mから55mまで5mずつ変化させて制約とした（表5.4）。

ここでの真値は約25m以内で会場内を歩いている状況であったので、25mの 때가適当と思われたがそれほど差はなく、その中でも35mの 때가精度平均、最良値ともに最も良かった。その理由として、以下のよう

- 制約移動距離が小さすぎると、そのような制約は破られるだけなので尤度も悪く、精度も悪い。
- 大き過ぎても、制約は守っているため尤度はよいものの制約自体が意味を持たないために、精度は悪い。
- 実際よりやや大きめに制約を取るのがよい解を見つけやすいといえそうである。

実際図5.11-5.16においてもそのような傾向が見て取れた。

表 5.4: 制約距離と精度の関係

制約距離	精度平均	精度最良値	精度分散	対数尤度
5m	11.7m	7.4m	0.8m	-64.6
15m	12.1m	6.7m	1.0m	-57.1
25m	12.2m	7.4m	1.3m	-48.6
35m	11.2m	5.0m	1.2m	-45.2
45m	13.4m	7.3m	1.1m	-43.3
55m	13.3m	11.4m	0.5m	-43.7
実験環境				
各値は10回の平均値				
個体数200, 世代数200				
生成時ランダム				
効率的サンプリング				



図 5.11: 制約移動距離：5m

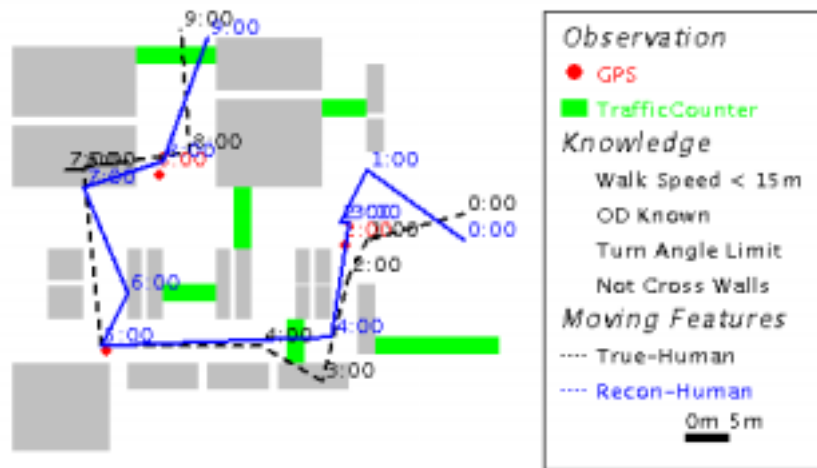


図 5.12: 制約移動距離：15m

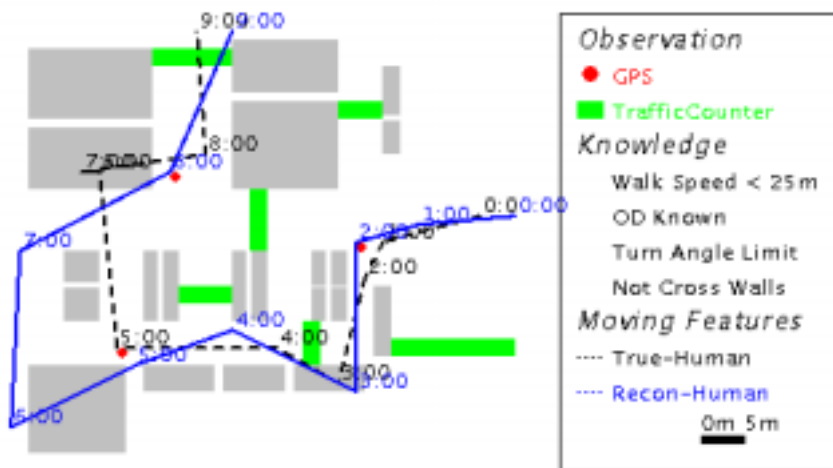


図 5.13: 制約移動距離：25m

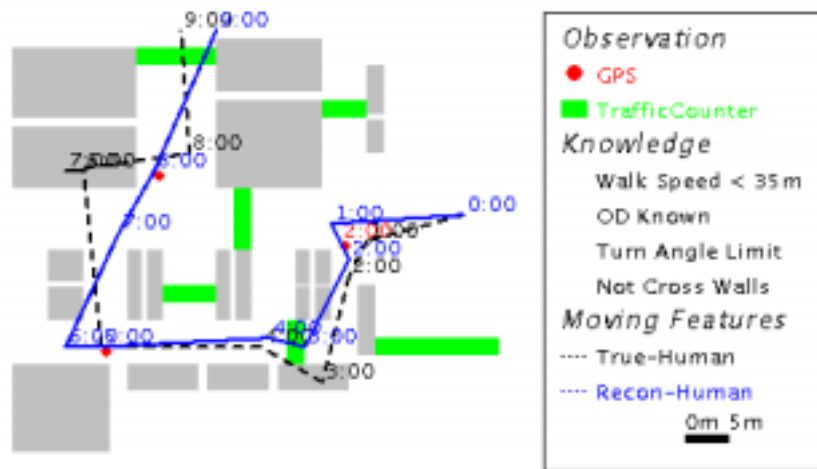


図 5.14: 制約移動距離：35m

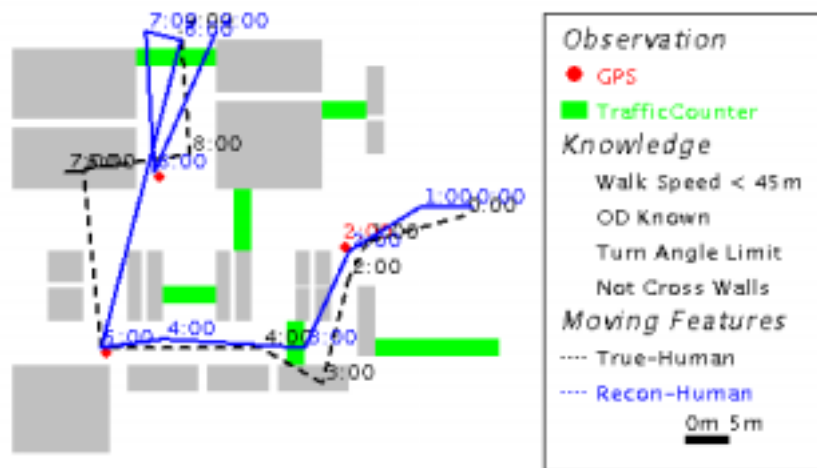


図 5.15: 制約移動距離：45m

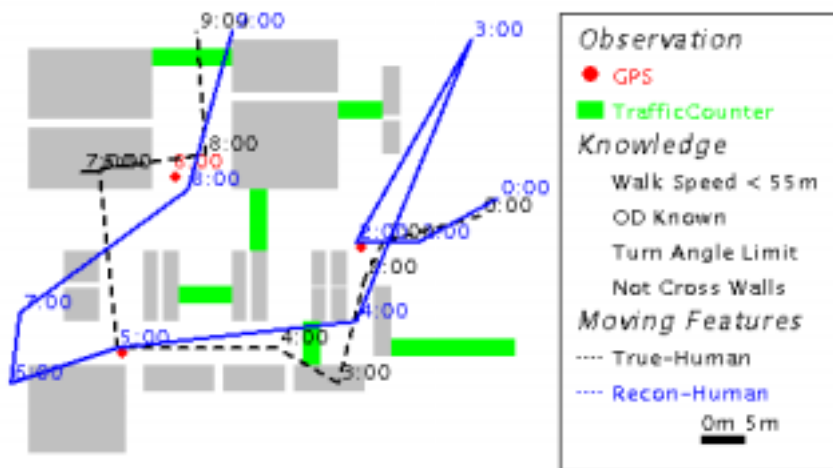


図 5.16: 制約移動距離：55m

移動空間制約

観測データのみをつなぎ合わせると壁を柱など通れない空間を突っ切ってしまう、非常に不自然に見える場合はよくある（図 5.17）。そのような不自然さを問題視する場合は制約をつけるべきである。以下の実験はそのような移動空間に関する制約をつけるかどうかどれくらい精度と時間が変わるかを見たものである（表 5.19）。結果としては多少時間がかかるものの精度は格段に上がった。実際制約をつけない場合は 4 箇所横切ってしまうて非常に不自然である。

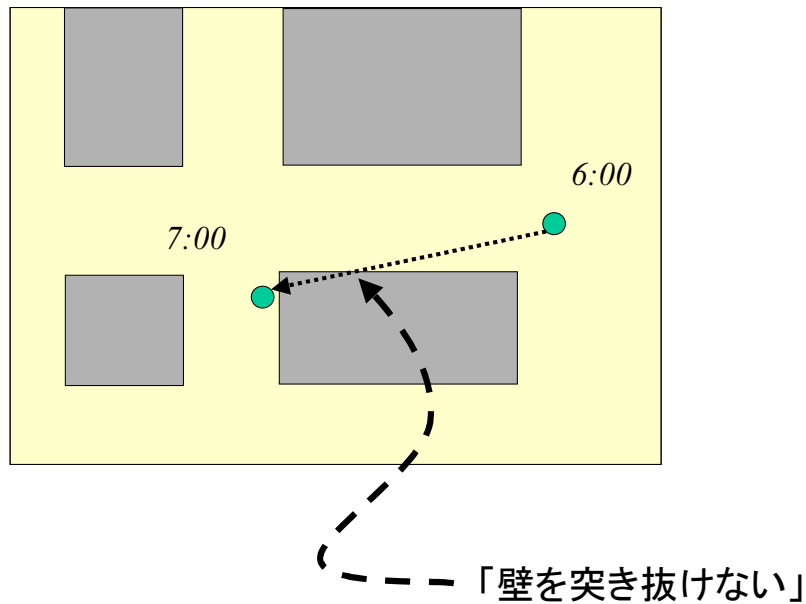


図 5.17: 移動空間制約

表 5.5: 移動空間制約を用いた精度と効率の比較

制約の有無	計算時間	平均精度	最良値	分散精度
なし	396s	13.0m	10.7m	0.70m
あり	500s	9.2m	5.8m	0.84m

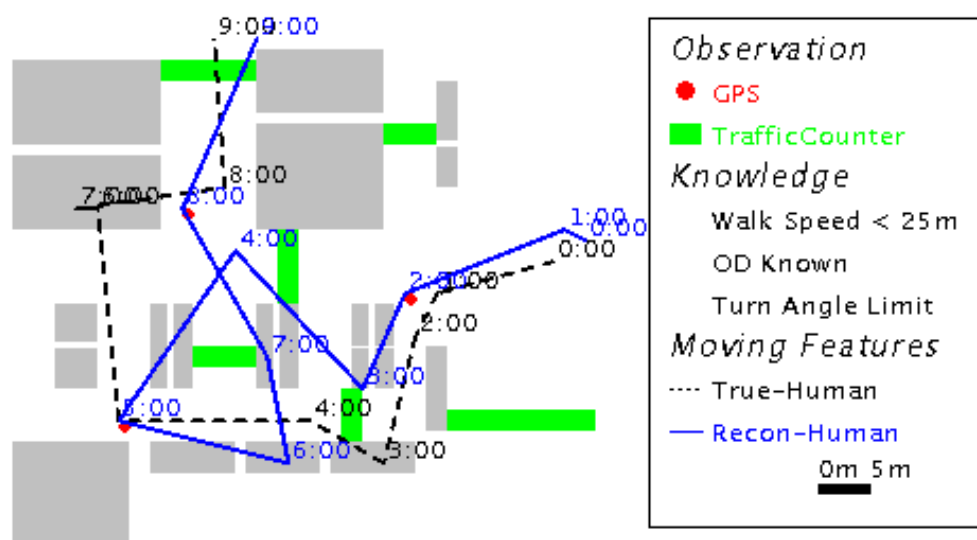


図 5.18: 移動空間制約がない場合

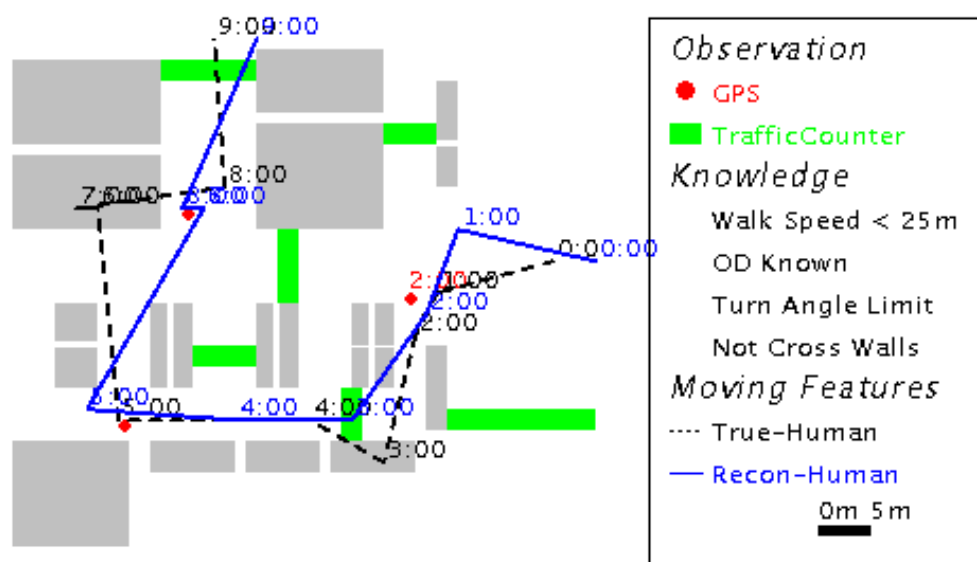


図 5.19: 移動空間制約がある場合

ターン角度制約

またターン角度を前後の位置から歩行角度を算出し、急回転はしないという制約を付けるのもある程度有効である（図 5.20）。遺伝子の時間間隔が長い場合は非現実的な知識であるが、

- 時間間隔がかなり短い場合、
- それほど道が多くなく経路の候補がかなり限られている時（たとえば首都高速における車の経路など）、

などが有効である。真値の状況から見て 120 度の制約が最も適当と思われたが、30,60 度などの「無理のある」仮定の方がむしろよかった（もちろん制約が破られがちになるので対数尤度そのものは悪くはなってしまう）（図 5.6）。これは逆になるべく滑らかな軌跡にしようと再現した結果、精度がよかったということの意味し、滑らかさを優先したい場合にはこれでもよいだろう。ただし、会場中央やや右下のブースの仕切り壁を突っ切っているためにその点は非現実的である（図 5.21,5.22）。

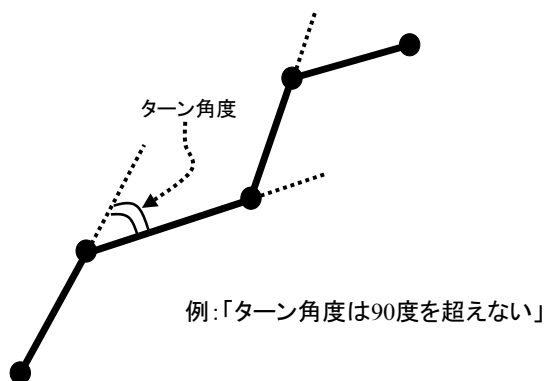


図 5.20: ターン角度の制約

表 5.6: 制約ターン角度と精度の関係

制約角度	平均精度	最良精度	精度分散	対数尤度
30 度	9.5m	4.9m	0.84m	-61.1
60 度	9.8m	4.8m	0.95m	-49.7
90 度	12.2m	6.3m	0.87m	-51.5
120 度	10.2m	6.6m	0.97m	-44.5
150 度	9.9m	6.8m	0.77m	-35.6
180 度	10.5m	7.5m	0.65m	-42.3
実験環境				
それぞれ 10 回ずつ行った。				
計算時間は 500s				

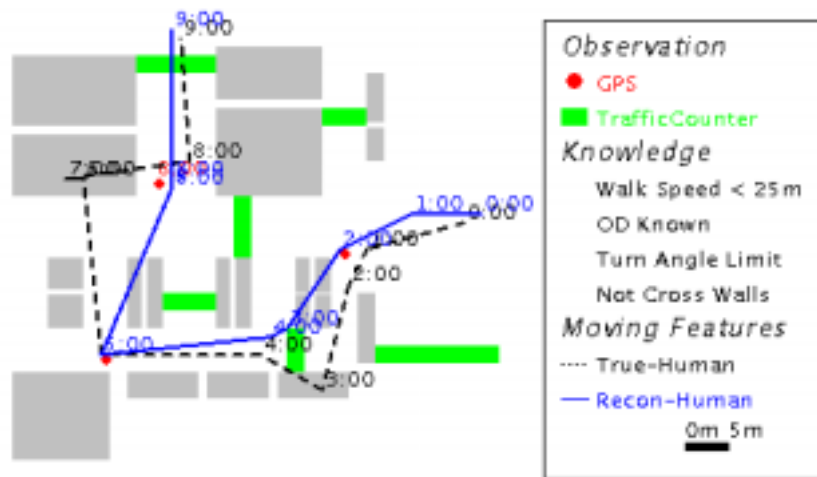


図 5.21: 制約角度：30 度

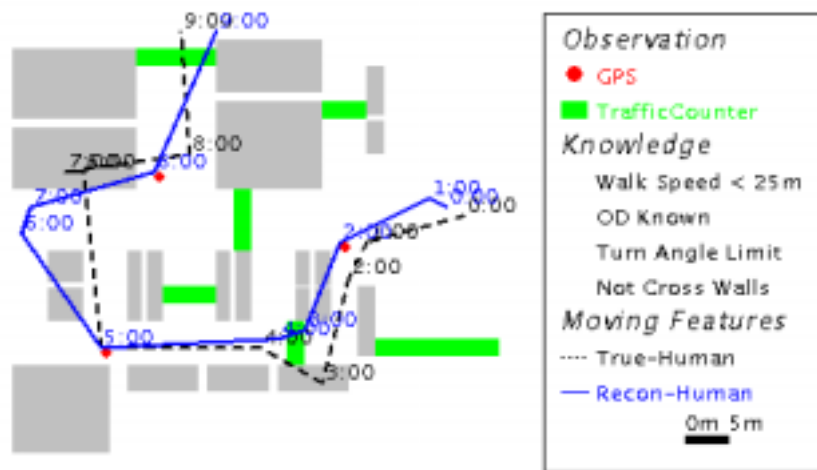


図 5.22: 制約角度：60 度

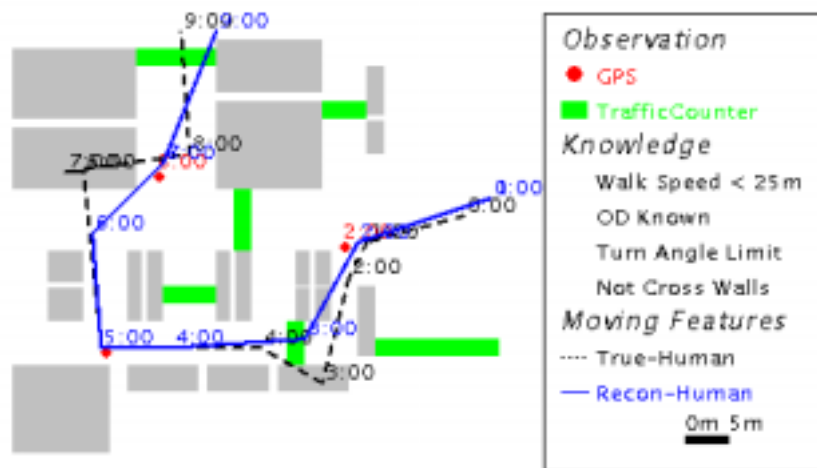


図 5.23: 制約角度：90 度

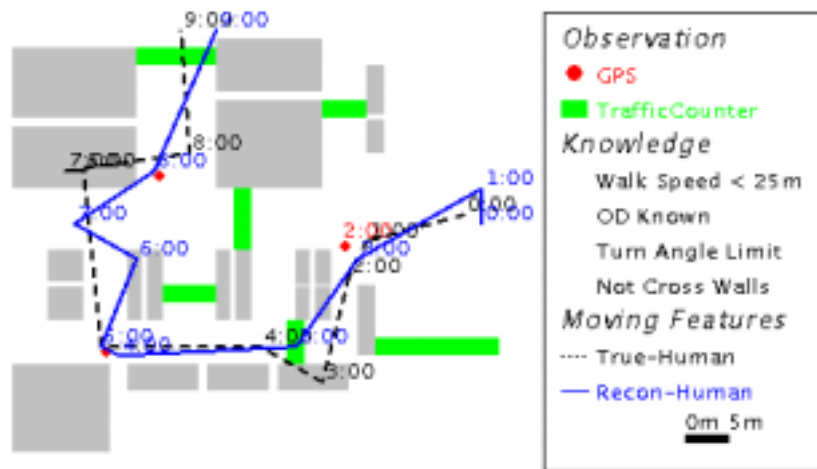


図 5.24: 制約角度：120 度

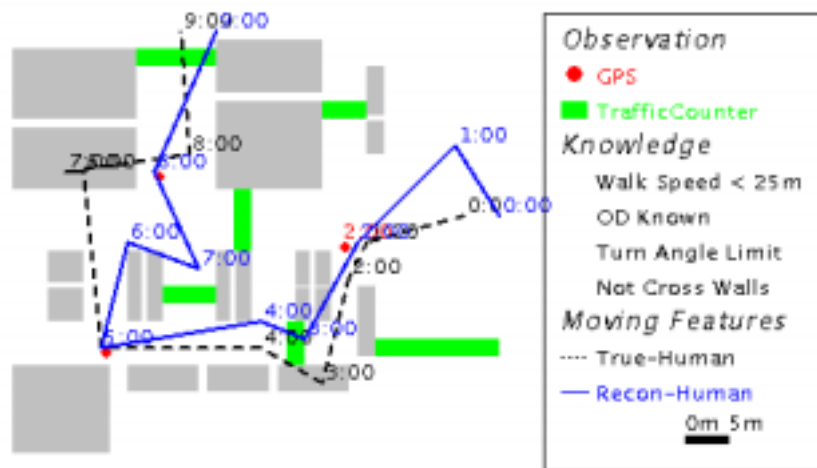


図 5.25: 制約角度：150 度

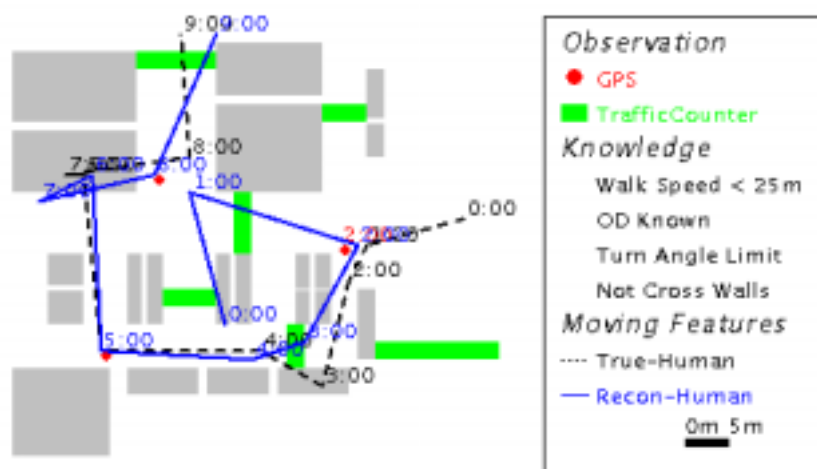


図 5.26: 制約角度：180 度

その他

最短経路探索による存在範囲の限定や誰かと一緒にいたというような他のオブジェクトとの関係による制約など、まだ有効と思われる知識はいくつかあるものの本研究では時間の都合上、ふれられなかった。

知識の分類

知識についても対象地物に対する記述の仕方によって分類が可能となる。表で示したようにまず記述対象地物が非集計か集計かにより、特定範囲が変わる。また記述特性が状態か変化かによって判定法が変わり、記述範囲の広さによっても判定範囲が変わる。

上記の分類に応じて知識の有用性を評価すること、あるいは類似の知識の場合はより効率的な知識表現を選択することが可能であるものの本研究では時間の都合上、以下にそれぞれの知識を付加した場合としなかった場合の違いを示すこととし、上述の比較検討は今後の課題とする。例えば AIC [赤池 76], MDL [Ris83, 山西 92] などで知識モデルの情報量を計量することにより、知識の情報量とその有効性の兼ね合いをはかる事などの方法が考えられる。

	対象 範囲	状態	変化
	ローカル	ある人のOD情報	ある時のターン角度
非集計	グローバル	経路が最短経路バッファに包含される	毎回のターン角度
集計	ローカル	渋谷にある時間にいる人数	渋谷である時間帯に変化した人数
	グローバル	全体の総人口のようなコントロールトータル	全体で見た時の変化率など

図 5.27: 知識表現の比較

5.2 GA による最適化問題にマッピングする際の精度・効率向上方法

ここでは、GA による最適化問題にマッピングする際の精度・効率を向上させる方法として、世代数、個体数、あるいは各種操作の組み合わせといった GA そのもののパラメータの比較や遺伝子表現における解像度の設定の仕方や知識に基づいて効率的に遺伝子の初期生成や交叉を行う方法などについて検討を行う。

5.2.1 GA のパラメータの比較

まず置換の組み合わせと個体数や世代数の組み合わせで精度を比較した。ここで行った SA は全ての遺伝子で他を固定したまま一回ずつ置換を行い、一番改善値が高かった遺伝子を置換する方法をとった。HC においても同様だったが探索範囲は効率上全探索ではなく遺伝子の位置の周辺の 10m に限定した。結果をまとめたものが表 5.7 だが、SA の効果はさほど感じられず、HC も個体数が 500 になって初めて優位さを体感できる程度であった。

表 5.7: GA 基本的パラメータの検討

条件	計算時間	平均精度	最良精度	精度分散
GA のみ (200 個体)	427s	8.0m	4.9m	0.76m
SA のみ (200 個体)	453s	10.1m	7.2m	0.56m
SA+HC (200 個体)	814s	9.6m	5.1m	1.01m
SA+HC (50 個体)	470s	8.5m	6.2m	0.54m
SA+HC (500 個体)	1447s	9.5m	5.9m	0.71m
実験環境				
各値は 10 回の平均値				
世代数 500				
生成時に起点とレンジ 10m で考慮				
解候補は間引いたもの				
ターン角度に関する制約あり (90 度)				

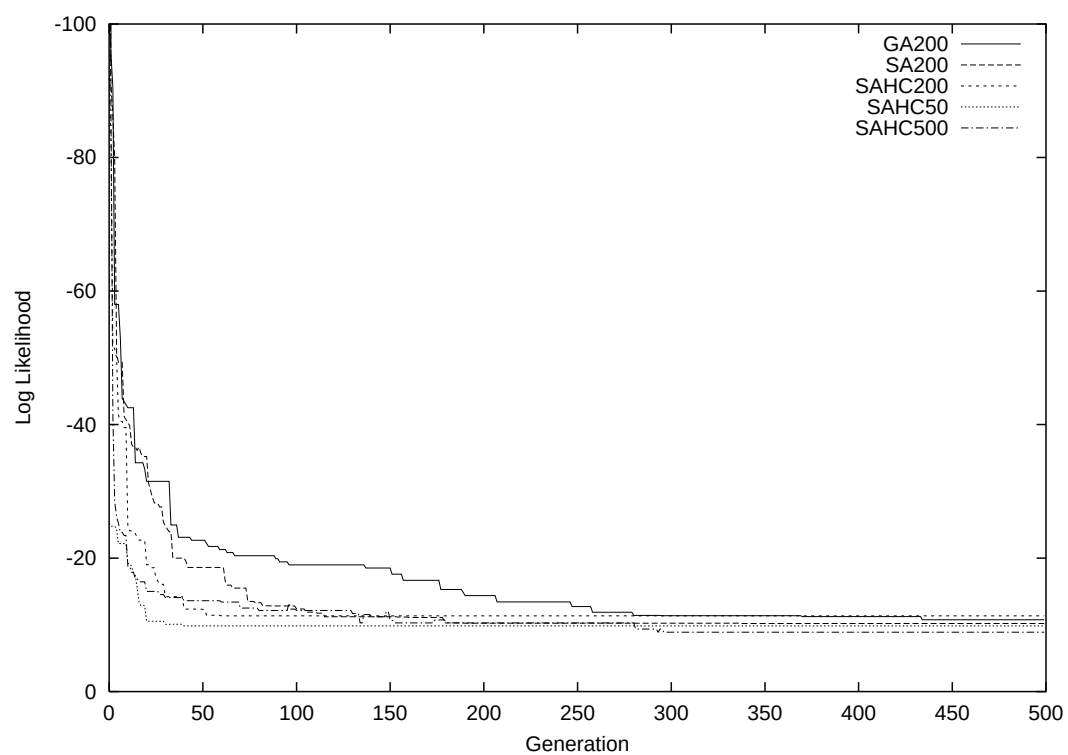


図 5.28: 基本的な GA のパラメータによる収束状況の比較

5.2.2 遺伝子表現における解像度の比較

たとえば 1 分ごとに再現したい場合に遺伝子側で時間間隔を 0.1 分で表現したら精度は向上するだろうか。以前は 1 分の間隔を直線内挿（あるいは他の内挿）しているためにそれに比べたらその間にも遺伝子を用意することになるので、遺伝子サイズは 10 倍になるので時間はかかるものの、より地物のミクロな特性が組み込めて現実的な解が得られると期待される。そこで行ったのが以下の実験であったが、結果はむしろかなり悪化した（表 5.8）。図 5.30 が示すように時間間隔を狭くしてもそれほど距離制約が守られずそれによってあちこち飛び回るような経路になってしまう。

表 5.8: 一定時間間隔に対する表現遺伝子数の違いによる精度と効率の比較

時間間隔	計算時間	精度	精度分散
15s	624s	14.7m	1.3m
60s	132s	8.0m	0.7m
実験環境			
各値は 10 回の平均値			
個体数 200, 世代数 200			
生成時に起点とレンジ 10m で考慮			
解候補は間引いたもの			
15s の時のみターン角度に関する制約あり（90 度）			

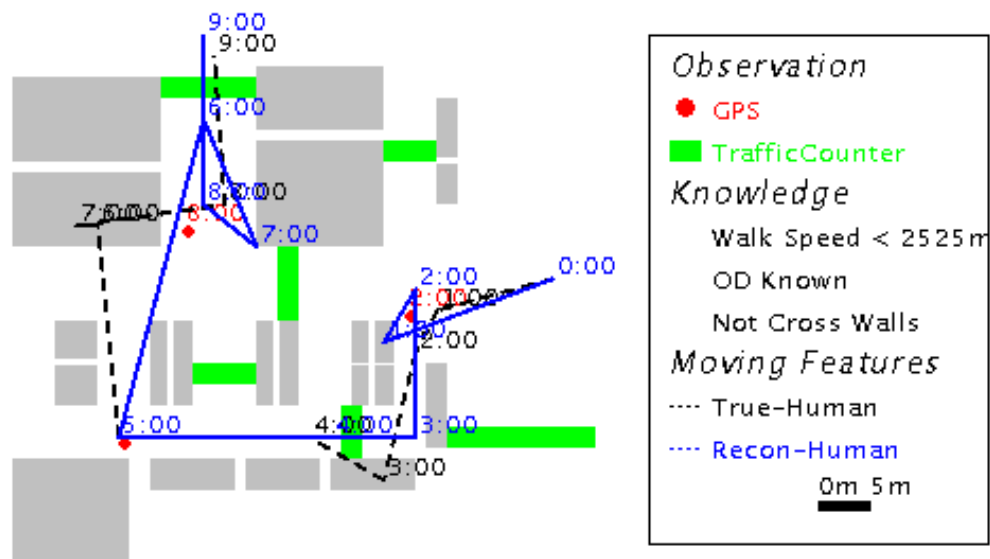


図 5.29: 普通の場合の軌跡

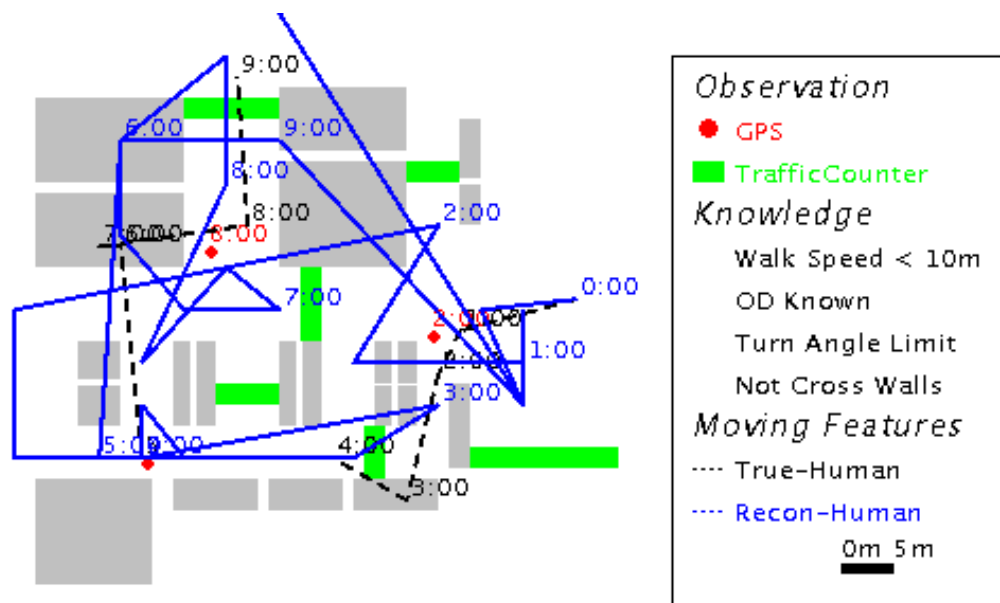


図 5.30: 知りたい時間間隔を複数の遺伝子で構成することにより再構成した軌跡

5.2.3 知識を利用した遺伝子の初期生成

解の評価時に知識を組み込み、それを事前確率に反映させるという方法は非常に明瞭な基準であるが、問題が複雑になっていった場合、初期値がランダム生成されていると、解空間が広大となりグローバルな最適解にたどり着けなかったり、非常に時間がかかる。そこで、評価時に使った知識を解の初期生成時にも使うことは可能である。そこで以下の実験では、

1. 何も使わずランダム生成の時
2. 距離制約のみ既知の時
3. 距離制約と O だけ既知の時
4. さらに OD が既知の時

の条件の時に比較を行った（表 5.9）。その時の初期生成の様子は図 5.31-5.34 に示した。この結果から、

- 移動制約程度の知識のもとに生成した初期値はそれほど役に立たない。むしろランダム生成の方が良い解が見つかった。
- 起点や終点のみ既知の場合はそれほどかわらない。
- 起終点とともに既知の場合はかなり向上した。

ただし起終点を反映させた初期値経路を生成するのに実はかなり時間がかかる。その生成時間については次に検討する。

表 5.9: 初期値生成の違いによる精度比較

初期値生成法	時間	平均精度	最良値	精度分散
ランダム生成	487s	9.0m	5.5m	0.73m
距離制約のみ既知	490s	9.7m	6.1m	0.86m
距離制約と起点のみ既知	483s	8.5m	5.5m	0.74m
距離制約と起終点既知	766s	8.2m	3.8m	0.79m

5.2.4 知識を利用した遺伝子の交叉

解の交換時での利用は、巡回セールスマンの適用例に見られるように [山村 92, GGRV85, GL85] 有効だと思われるが本研究では行っていない。たとえば、通勤ラッシュが示すように誰にとっても共通な時空間経路はあるだろう。その経路を各地物間に広めることはできるだろうか。本研究で用いている交叉は一点交叉であり、地物間（人と人の間）での経路の交換はありえない。しかし、ちょうど交叉点を含む人に関しては他人の経路を受け継ぐことはある。それを拡張すると多点交叉した場合は交叉点を含む人は交換可能であるもののそれでも隣り合った決まりきった人のみである。今後検討が必要である。

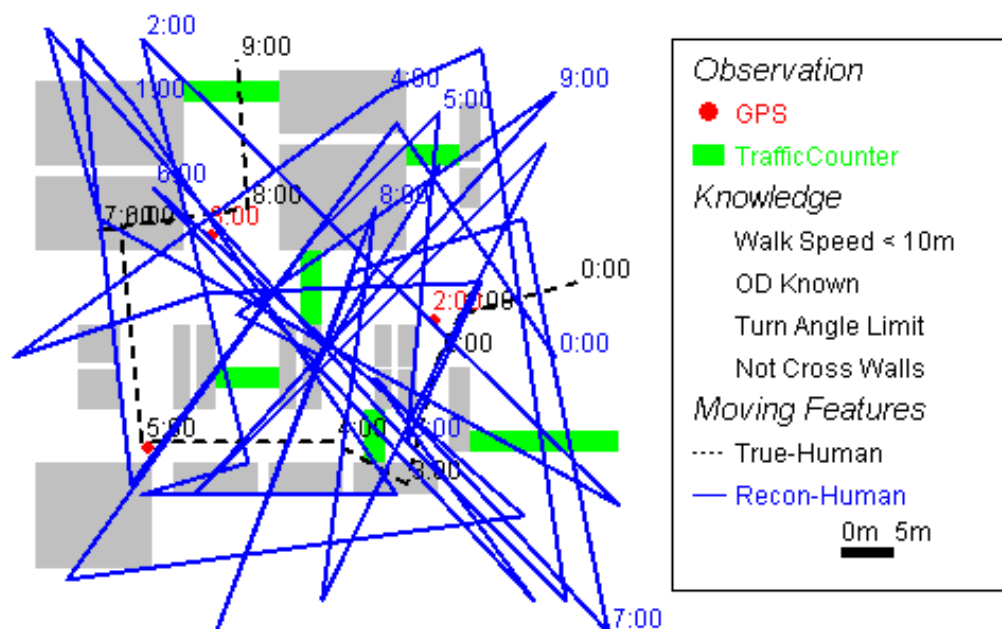


図 5.31: ランダムな生成

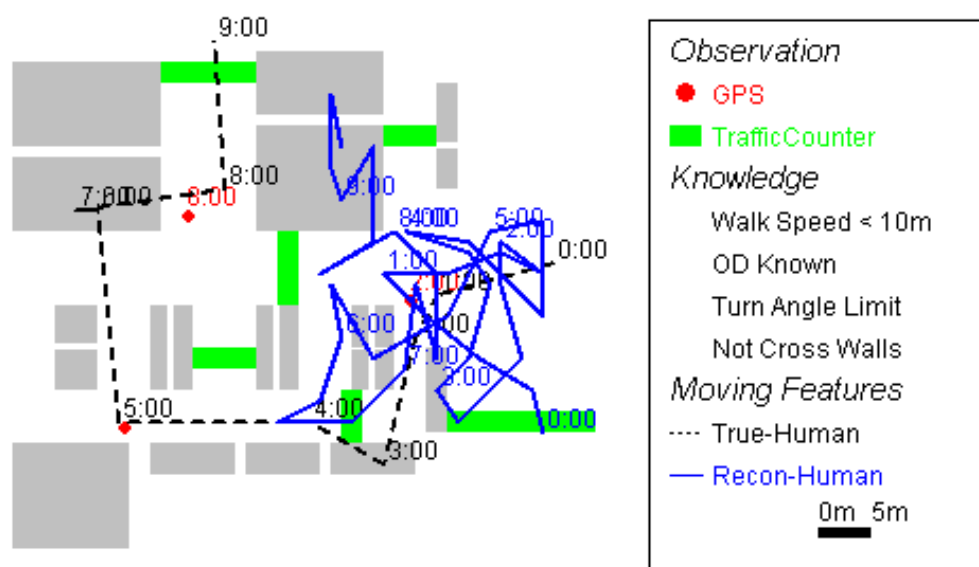


図 5.32: 距離制約のみ既知の時

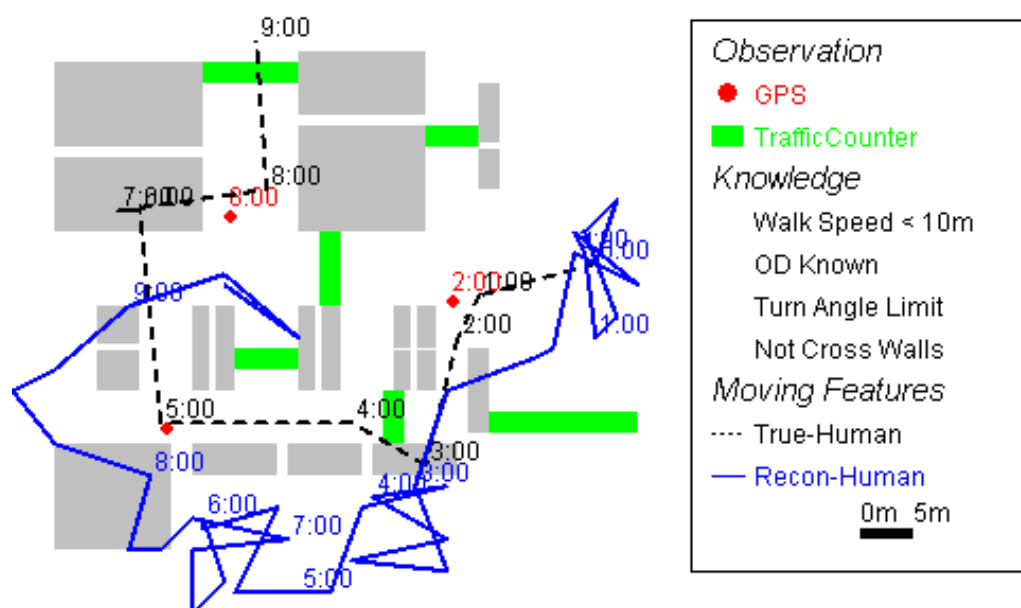


図 5.33: 起点のみ既知の時

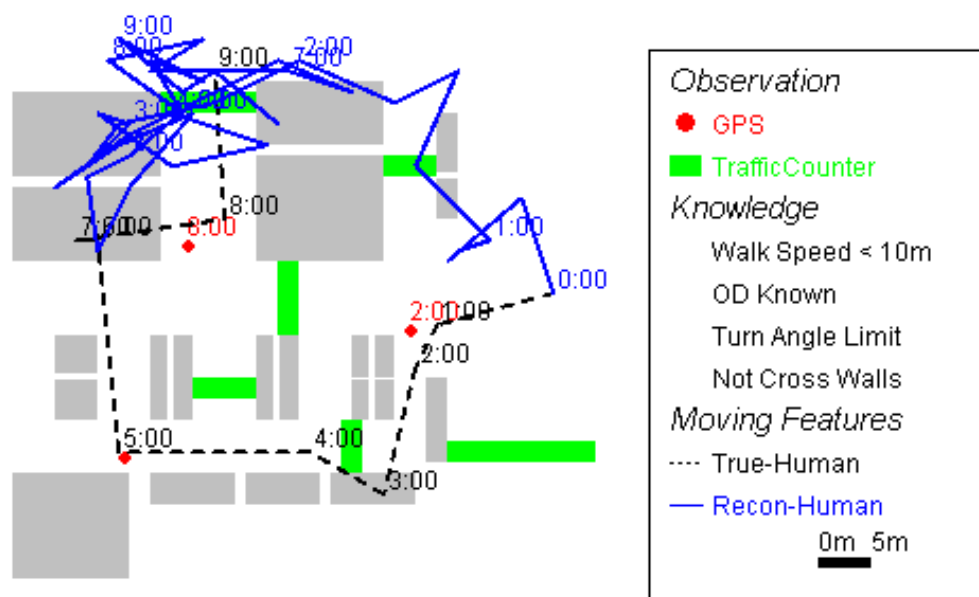


図 5.34: 起終点ともに既知の時

5.3 計算機処理時の精度・効率向上方法

最後に純粋に計算機の処理における精度・効率向上の工夫として、プログラム実行環境の検討，あるいは計算機の数そのものを増やした場合の並列化などについて検討を行う。

5.3.1 プログラム実行環境の検討

本研究では可搬性が高く，分散環境が容易に構築できる Java でシステムを構築しており，図 5.35 のように，ソースコード構築，コンパイル，実行^{*1}の手順をとっている。本来は最適化コンパイル，ボトルネックのチューニング，各ベンダー提供ごとの JDK(Java Development Kit) ^{*2} の比較などが必要だが時間の都合上，JDK のバージョンの比較と CPU 速度の比較のみを行った。基本的に前章の実験 3 と同じであるものの，効率的なサンプリングを用いたので計算時間そのものは多少早くなっている（内挿は行っていない）。

```
>javac *.java // ソースファイルのコンパイル
>jar cvf myJar *.class // クラスファイルを一まとめにする
>java -Xmx1024m -Xms512m mypackage.Main input.txt // 実行する
```

図 5.35: 実行までの手順

CPU 環境

CPU については以下の 2 種類で比較を行った。Pentium4 では RDRAM ^{*3} を利用したためにかなり早くなると期待されたが，クロック数に比例した程度であった。

表 5.10: CPU 速度による計算時間の比較 (Windows2000,SunJDK1.3.0,Memory:128MByte 使用時)

CPU 速度	計算時間
Pentium3 650MHz	906s
Pentium4 1.7GHz	422s

JDK と OS 環境

JDK については以下の組み合わせで行った。JDK1.3.x においては Windows と Linux でさほど速度差は見られなかったものの JDK1.2.x との間では非常に性能差が見られた。もちろん 1.3.x になり，HotSpot が採用され「パフォーマンスが劇的に向上した」と言われているが，それだけの理由かどうかはわからなかつ

^{*1} GA ではメモリを非常に消費するので実行時にオプションを付け，予めメモリの利用領域を明示的に指定している。-Xmx1024m はメモリ割り当てプールの最大サイズが 1024MByte(1GByte)であることを意味し，-Xms512m はメモリ割り当てプールの初期サイズが 512MByteであることを意味する。

^{*2} Java は Sun Microsystems, Inc. によって策定された仕様に基づき各ベンダーがコンパイラや実行環境を JDK という形で提供しており，それぞれ特徴があるために実行時の速度等が異なることも多く注意が必要である。

^{*3} Rambus DRAM のことで外部バスインターフェイスに Rambus を採用した DRAM で，9bit 幅のデータバスを持ち，最大 500Mbytes/sec でデータを転送でき従来に比べ高速なメモリバス速度を実現する。

た。そもそも JDK1.3.0 でコンパイルしたものを JDK1.2.x で実行したからという可能性もあるが、現時点では一般機には 1.2.x がプリインストールこともかなりあるのでこの問題を解決することは今後必要である。

表 5.11: OS と JDK の組み合わせによる計算時間の比較

OS,JDK	計算時間
Win-1.3.0	422s
Linux-1.3.1	494s
Linux-1.2.2	約 11220s
Win-1.2.2	???s

5.3.2 並列化による分散処理の検討

分散処理による効率化は大きく分けると、

- 役割の並列化
- ハードウェアの分散化

前者に関しては、Tanese [Tan89] の研究があり、複数の下位集団がありその間で移住が発生するなどの研究があり、後者は Robertson [Rob87] のコネクションマシンを使ったものや、Kitano [KSH91] の連想メモリを使って高速化を試みたものなどがある。今回は時間の都合上並列化までは出来なかった。

第 6 章

大規模問題への適用に関する考察と試算

本章ではより大規模な問題に本手法を適用していくために考察すべきことをまとめた。

6.1 概要

本研究が対象としてきた問題がより大規模になった場合、解決すべき重要な問題として、

- 最適解に収束するために必要な観測数の把握
- 最適解に収束するために必要な計算時間数の把握

が挙げられる。前者の必要観測数に満たなければローカルミニマムに収束してしまう可能性が高くなり、後者の計算時間を把握するのは実用上重要である。計算時間に関しては、規模と必要観測オブジェクト数との関係を把握することにより一世代一個体当たりの評価時間が推定でき、規模と収束世代数との関係を把握することにより必要世代数が把握でき、両者を併せる事により最適解に収束するまでの時間が把握可能となる（図 6.1）。従ってその両者を把握することが重要といえる。

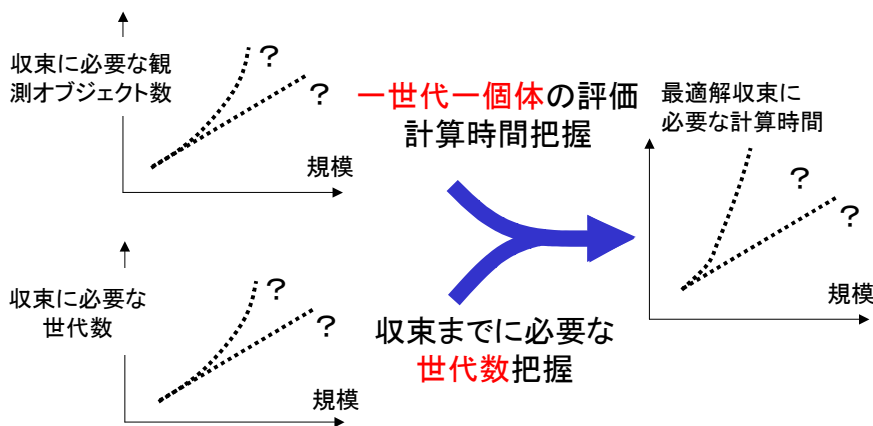


図 6.1: 計算時間の算出過程

6.2 規模の定義

そもそも規模というのはどのように定量化すべきであろうか。空間的に規模が広くても解像度を粗くすれば問題の規模が大きいとは言えないし、空間的に規模が広くても解像度を細かくして厳密に求めようとした場合は問題の規模は小さい。従って本研究では問題の規模を解空間の広さととらえ、場合の数がどれくらいあるかを指標とした。図 6.2 が示すように、非集計行動を再構成する場合の数は A さんはある時刻で存在空間の取り方は空間メッシュ通りある。各時刻で自由に存在空間を取りうるので、空間メッシュに時間メッシュを乗せたものである。そしてその場合の数は各人ごとに自由にとれるのでさらに人数分だけ掛け合わせることになる。従って、空間メッシュ数を $snum$, 時間メッシュ数を $tnum$, 人数のステップ数を num とすると、非集計時の場合の数 c は、

$$c = (snum^{tnum})^{num} \quad (6.1)$$

$$\log c = (num)(tnum) \log snum \quad (6.2)$$

また集計行動時は、ある時刻での場合の数は人数ステップ数に空間メッシュを乗せたものであり。それを時刻ごとに掛け合わせるになるので集計時の場合の数 c は、

$$c = (num^{snum})^{tnum} \quad (6.3)$$

$$\log c = (tnum)(snum) \log num \quad (6.4)$$

となる。従って、他の要素に比べて非集計時は空間メッシュの増加に対して強く、集計時は人数ステップの増加には強い。

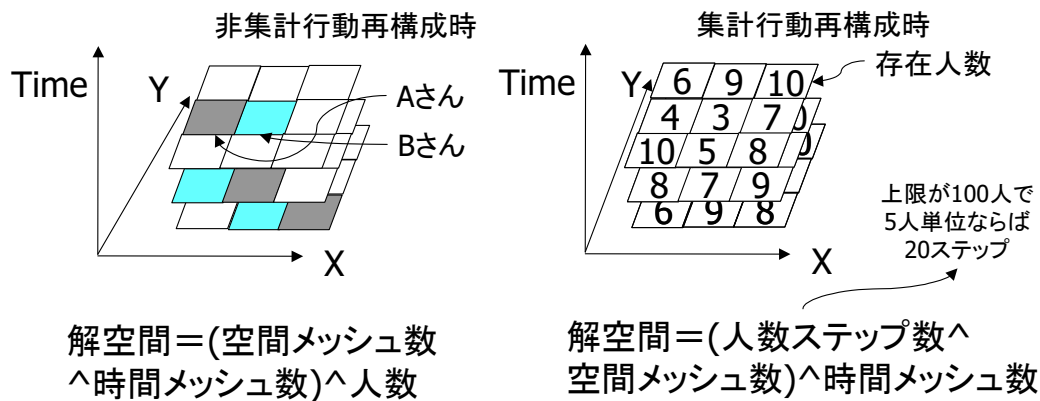


図 6.2: 解空間の広さをを用いた規模の定義

図 6.3 ではいくつかの規模の問題についての定量化を行った。下から上に行くほど大規模であり、対象人数が増えるに従い大規模になる。対象人数の増加につれ非集計時は爆発的に規模が大きくなるものの、集計時は急激には増大しない。また集計時には人数のステップを大きく設けることにより問題のサイズを小さくすることが可能である。

規模レベル	対象空間 ／解像度	対象時間 ／解像度	対象人数	非集計時 解空間	集計時 解空間
都市圏における人々の一日の活動	10km／ 100m	1day／ 10min	1 1,000 1,000,000	10 ⁵ 76 10 ⁵ 76,000 10 ⁵ 76,000,000	10 ⁵ 0,000 10 ⁴ ,320,000 10 ⁸ ,640,000
ある駅周辺の一日の活動	1km／ 10m	1day／ 10min	1 1,000	10 ⁵ 76 10 ⁵ 76,000	10 ⁵ 0,000 10 ⁴ ,320,000
あるフロアの一時間の状況	100m／ 5m	1hour／ 1min	1 100	10 ⁸ 78 10 ⁸ 7800	10 ³ 60 10 ² 400
テスト用の実験	50m／1m	10min／ 1min	1 10	10 ³ 0 10 ³ 00	10 ¹ 50 10 ¹ 500

図 6.3: いくつかの問題の規模の定量化

6.3 問題の規模と収束に必要な観測オブジェクト数と世代数との関係

問題の規模と収束に必要な観測オブジェクト数の関係

章の始めに述べてきたように問題の規模と収束に必要な観測オブジェクト数の関係を知る必要があるものの、具体的な相関関係は経験的にしか把握できていない。さらに、

- 同じ規模でも観測の質に依存する
- 同じ規模でも知識の質に依存する

という性質を持つ。観測等の質は誤差や対象となる時空間範囲の大きさなどに依存している、すなわち誤差が小さいほど少ない観測数で収束することなどを意味するがこれらの定量的な把握は今後の課題である。

問題の規模と収束に必要な世代数の関係

同様に問題の規模と収束に必要な世代数の関係も経験的にしか把握できていない。さらに、

- 同じ規模でも最適化問題の性質に依存する

点は克服すべき大きな問題であり、遺伝的アルゴリズムにおける研究の成果をさらに援用する必要がある。

6.4 展示会場を想定した人の流動再現

ここでは展示会場を想定した人の流動再現のシミュレーション実験をある程度大規模な人数で行い、収束世代や計算時間あるいは収束時の精度などの比較を行った。実験の諸元に関しては表 6.1 の通りである。結果は表 6.2 に挙げた通りであるが、まず収束世代数については 100 人の時が時間の都合上収束を確認できなかったものの人数が増えると確実に収束に要する世代が増加した。一世代あたりの計算時間もトラフィックカウンタが全員について通過したかどうかチェックを行うために規模が拡大すると非常に時間がかかった。従ってトータルで要する時間も非常にかかってしまう。また GPS は全員持っている限りは規模

が大きくなってもそれほど非集計精度が減少しないが一部しか持っていない場合はやはり非常に悪くなる。断面通過人数による集計精度は人数増加に対しそれほど悪化しなかった。

表 6.1: 実験共通諸元

エリア	60m 四方の展示会場
再構成時間	1 分間隔で 10 分間
空間表現	自由空間型 (3m メッシュ)
時間表現	ラスター (1 分間隔)
観測データ 1	トラフィックカウンター (12 箇所固定, 1 分ごと計測)
観測データ 2	GPS (対象人数に対して全員 or 一部が保持, 3 分ごと計測)
使用知識 1	「展示場内では分速 25m 以上で移動しない」
使用知識 2	「壁は通過しない」
使用知識 3	「全ての人の OD は既知である」
非集計評価法	1 分ごとの位置ずれの平均
集計評価法	断面交通人数 5 箇所の平均
遺伝子個体数	50

表 6.2: 対象人数による収束世代数, 計算時間, 収束精度の比較

対象人数	観測条件	収束世代数	計算時間 (一世代)	計算時間 (合計)	精度 (非集計)	精度 (集計)
100 人	GPS10 人分	—	5.5 分	150 時間 (2000 世代と仮定時)	10.1m (打ち切り時)	5.6 人 (打ち切り時)
10 人	GPS10 人分	500 世代	30s	5.1 時間	5.5m	0.6 人
1 人	GPS1 人分	200 世代	6s	21 分	5.2m	0.1 人

なお、図 6.4 と図 6.5 である時刻における 100 人の真の時空間位置と再構成した時空間位置の比較を行った。現時点では非集計的に評価した場合より精度が得られないものの、集計的にブースにおける滞在人数等を評価した場合は誤差は思ったほどは大きくない (図 6.6)。ただし今後、よりよい精度を得るよう様々なチューニングを行う必要がある。

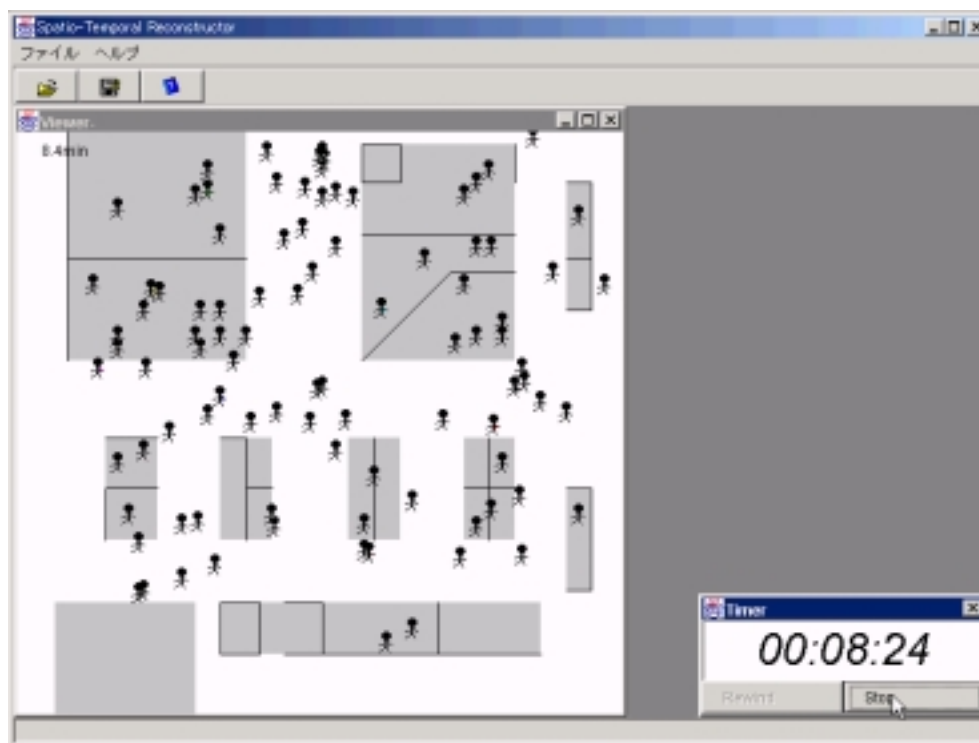


図 6.4: 100 人の真の時空間位置

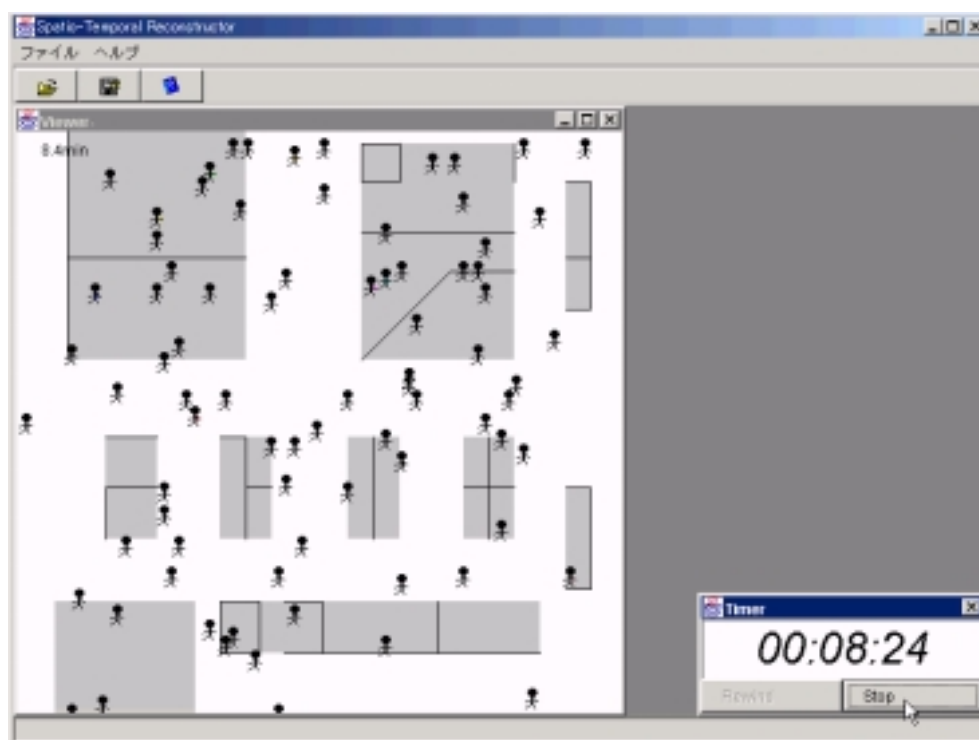


図 6.5: 100 人の再構成された時空間位置

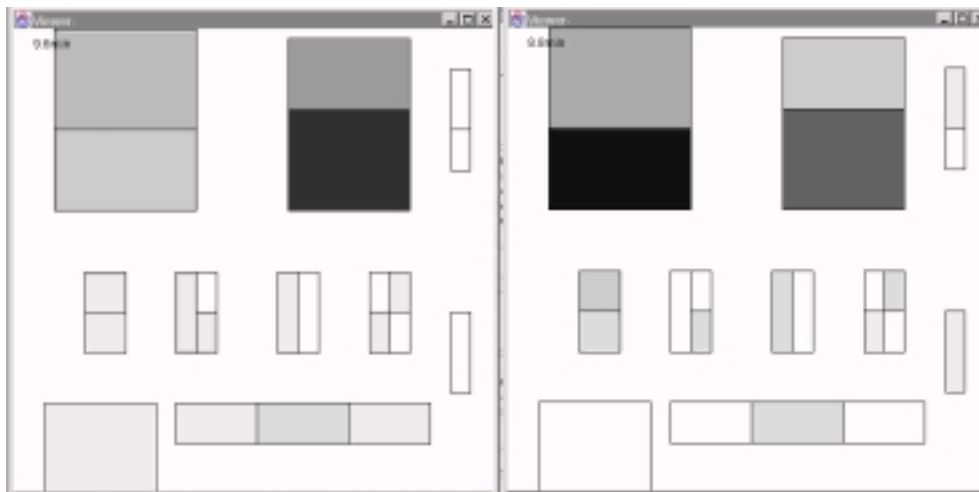


図 6.6: 100 人の真値と再構成値をブース滞在人数に集計し直して比較したもの

6.5 都市圏における人々の一日の行動再現への適用可能性の検討

最後に、より広域の都市圏における人々の一日の行動再現への本手法の適用可能性を検討する。図 6.3 で試算したように非常に規模の大きい問題であるが次の特徴を利用することにより多少簡単にすることができる。

- 広域で見た場合、移動は鉄道や道路ネットワークのリンク上のみに限定されるので、ネットワーク空間型で考察してもよいと考えられる。
- ある場所の滞在人数・通過人数といった集計行動のニーズの方が多いので非集計行動が必ずしも再現できなくてよい

しかしそれでも非常に困難であり。人数を 100 万人、ノード数 1000 とした場合、

- 1000 人ずつが同じ時空間ノードを持つと想定すれば 1000 人分になり、
- 1 時間ごとの位置を求めるのみにすれば時間メッシュ数は 24 になり、

それでも表 6.2 の計算結果から外挿すると約 1 年かかることに現時点ではなってしまう。

第 7 章

結論と今後の課題

7.1 結論

- 2章 まず2章では、様々なデータからダイナミックに変化する実世界の地物の状況を推定するという一連の流れを円滑に遂行できるシステムが重要であることを明らかにし、そのためには、とくにデータを構造化し、構造化されたデータをもとに、自動的にデータを統合し再構成を行うという2点が重要であることを示した。
- 3章 また2章の示唆を受けて、3章ではまずデータを構造化するためのデータモデルを提案した。とくにダイナミックに変化する実世界を表現するには地物以外に地物を観測する存在、地物に影響を与える存在が重要であると考え、FEO(Feature/Event/Observation) モデルを提案し、それぞれの特徴を反映したデータ構造とした。
- 4章 4章では、構造化したデータをもとに、再構成を行うアルゴリズムを提案した。真の地物の状態が分からないものの観測データや地物に関する断片的なデータがある時、それらに最も適合するように推定を行うという基準にし、そのための最適化手法として本研究はGA すなわち遺伝的アルゴリズムを使用した。これは地物の状態を一次元の遺伝子というシンプルな表現で表せ、解空間が広大な場合でも真の解の近くまでは求まりやすいという性質を持つからであった。実際にシミュレーション実験で1人の人間の10分間の時空間位置を、3分間隔という割と粗い非集計データから他の観測データや人間の行動特性に関する知識を組み込むことによって真値に近い時空間位置を再現することに成功した。
- 5章 しかし、前章で求めた解は求めるのにかなり時間がかかり、精度もまだ向上の余地があったため、地物や観測オブジェクトの表現、あるいは遺伝子の表現方法を工夫し、かなりの改善が見込めた。また地物に関する知識についても、様々な条件で比較を行い、再構成という観点から見た場合に有用な知識の傾向を把握した。
- 6章 より大規模な問題に適用するために検討すべき事項を明らかにし、シミュレーション実験を行うことにより大規模な問題についてもある程度は道筋をつけた。

7.2 今後の課題

今後の課題について、早急に取り掛かるべきものから順に挙げた。

- 本研究ではイベントについては提案しているものの、まだ実装の程度も含めてまだそれほど深く突っ込んでいない、今後早急に取り掛かるべき課題である。
- また大規模なエリアにおける滞在人数の時間変化を知りたい場合、ラグランジェではなく、オイラー表現からのアプローチが欠かせず、検討したい。
- それだけでなくネットワーク表現をより追及することにより、都市圏のマクロな人の動きを追うことがかなり可能になると思われる。
- また規模と観測オブジェクトの関係、収束世代数の関係はまだ経験的な把握に過ぎない。理論の構築とシミュレーション実験をさらに積み重ねていく必要がある。
- 現段階ではまだアルゴリズムに効率化を施す余地が大いにあり、アルゴリズムの見直しや探索の効率化を進め、計算効率を1~2桁上げたい。
- しかしその一方で分散化についてのベクトルを伸ばすことも重要でありハードウェアからの高速化も目指したい。
- さらに中長期的なものとしては、分散化をはかる際にメタデータや知識の記述をXMLで記述することによりより容易に統合・再構成を行えるようにしたい。
- また観測データ群から今まで何も記述のなかったことに関する知識が自動的に獲得できるシステムを目指すデータマイニング的アプローチを進めるべき課題である。これによってイベントディテクション等、「知らない所で起こったこと」が検出される可能性がある。
- あるいは非集計地物と集計地物の混合により、人の相互作用を入れ、ボトムアップ的なアプローチを保ったままより大規模な問題を解くことが興味深い。例えば以下の図7.1では混雑している所を通りたくないAさんとむしろ立ち寄っていきたいBさんのような性質を入れつつ、あまり興味の対象ではない人の集団のような集計地物も含めて再現するなどである。

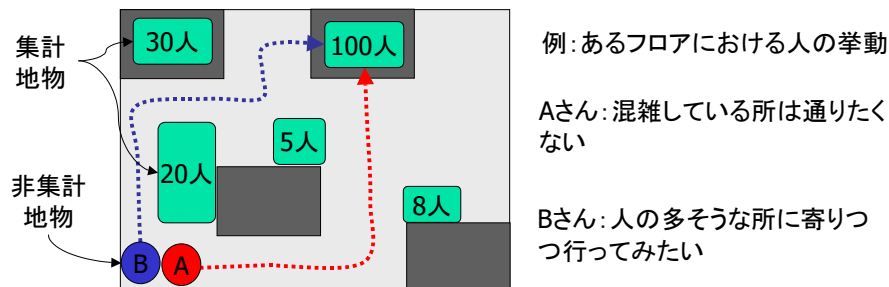


図 7.1: 非集計地物と集計地物の混合

付録 A

四次元ライブラリの構築

ここでは四次元ライブラリの構築に関して述べる。四次元ライブラリは三次元空間と時間を表現し各種操作を行うためのパッケージであり、プログラムパッケージレベルで与えられることにより、包含判定、交差判定のように何度も行う必要がある処理に関してもユーザー側のプログラム内で使用することが可能である。

二次元空間に関する表現や処理については計算幾何学等の蓄積が近年急速になされてきているためにここでは省略する。標準的なものとして [伊理 97, M. ド 00] 等を参考にされたい。また時間に関しては人工知能の分野などで研究されてきており、一部地理情報の標準化に反映されている概念もあるため、A.1 にその流れをまとめた。一方、GIS の分野では空間的要素がより重視されることが多いために、空間的要素の時間変化という一体化された時空間要素で考える必要がある。時空間要素の研究の流れを次にまとめ、そのような流れの中で生まれた標準化の動きに関して A.2 にまとめた。最後に本研究で必要となる基礎的なツールとして、四次元ライブラリパッケージを構築した。これは基本的には ISO/TC211 の成果に沿ったものであり、さらに時空間スキーマを実現するパッケージまで拡張を行った。

A.1 時間に関する研究の流れ

推論の必要性

GIS において、データの計測、取得、データベース (DB) の構築、データから実世界の再構築、推定の一体化した開発を考えたとき、時々刻々と入ってくるデータにより誤情報の検出、イベントの推定、抽出などの様々な推定がなされるが、その際に使われるのが推論技術である。特に Dynamic なシステムの場合は Temporal な推論技術が必要となる。例えば AI、情報科学の分野でロボットに対する外界の変化をいかに処理するかということを考えた場合、そのような推論技術が必要になるのは想像しやすい。

時間の表現

まずその際に必要になる概念としてオブジェクトの相互の時間関係があるので、それを定義しなくてはならないがそれをしたのが、Allen (1983) の "Maintaining Knowledge about Temporal Intervals" である [All83]。ここでは equal, before, meets, overlaps, during, starts, finishes の 7 つの概念が定義されている。Temporal Reasoning に関する論文では間違い無く参照されている概念である。ISO/TC211 の Temporal Relationship にも導入されている。なお Allen は時間表現のタイプとして、世界の状況はその時点で成立す

るファクトの集合として表され、イベントによってのみ成立するファクトが変化すると考える「状態空間型」、時間データベースのようなファクトやイベントの情報を発生時刻や成立する区間の索引を付けて記述する「時間列型」、発生したイベントの情報をイベント間の前後関係として記述した「前後関係記述型」、状況の変化の因果関係を時間のパラメータを含む関数として「関数型」の4つに分類し、自らはその前後関係記述型に分類している。

Action の推論技術

また Allen はその次の段階として、計画立案 (Planning) のような時間が重要な要素として存在するシステムに対する解決法のための準備として、Allen (1984) "Towards a General Theory of Action and Time" を発表し、temporal logic をベースとした action に対する推論技術を提案した。ここでは activity を events, processes, actions, properties からなり、non-activity を beliefs, intentions としてどちらも扱えるようにし、external events や multiple agents が存在する dynamic world 内での planning 問題を扱えるような枠組みを提案した。なおこの研究は 1970 年代に有った一連の行為が所定のゴールを達成することを証明するために導入された状況と行為の述語論理の形式化である状況論理の研究を受けて、因果関係・持続性などの概念と新たな表現要素を持った新たな時間論理といえる。McDermott (1982) も "A Temporal Logic for Reasoning About Processes and Plans" でそれに近い時間論理を提案している [McD]。

論理プログラミングの枠組みにおける Event

その直後に、Kowalski (1986) は "A Logic-based Calculus of Events" を発表し [KS86]、データベースの更新への応用を念頭に置いた、論理プログラミング (Prolog のような) の枠組みでの event に対する推論技術を提案した。彼は論理プログラミングにおける問題の解法における権威でもあるが、彼自身 time periods の使い方、特に、events に重点を置いている点、start と end で (つまり区間で) time period を考えている点で、Allen に非常に近い考えを持っていることを述べている。また同様に論理プログラミング内での定式化を試みた研究に Lee, Coelho, Cotta (1985) "Temporal Inferencing on Administrative Databases" があつたことも述べている。さらに Kowalski は論文の中で「状態は、中断されることが明示的に証明されない限り (過去にも未来にも) 継続する」というデフォルト推論法も使用している。なお明示的に状態が中断されることが証明されるケースとして、状態 p の終了を意味する知識が存在している場合と p と同時性制約を満たす状態 q が存在する場合と 2 つある。また Hanks, McDermott (1986) らは "Default Reasoning, Non-monotonic Logics, and the Frame Problem" でデフォルト推論の総括的な議論を行い、時間の流れを含む推論へのデフォルト推論の適用の問題点 (デフォルト推論を時間の推論に形式的に適用すると直感に反する事実を推論する Yale Shooting Problem など) について論じ、さらに時間の方向性などを考慮した推論を提案している (Brown, F. M(ed.)1987: The Frame Problem in Artificial Intelligence)。ところで、Kowalski は状態の開始 (since) と終了 (till) を表現したが、それだけでは不十分とし、状態の継続 (holdat)、時区間 (between)、動作や出来事 (at) などを定義した論文もある ([原裕] など)。しかし述語論理の拡張というだけでは限界があると思われる。

Shoham の非単調論理

上のような時制論理の研究を受けて Long (1989) は”A Review of Temporal Logics”の中で時制論理を 1 階論理 (first order logics)、様相論理 (modal logics) 等に分類しているが、これらは単調論理であり、Shoham は (1988) ”Reasoning about change”の中で、新しい情報の追加は既存の情報の構造を無効にするとして causal logics は非単調論理であるべきだとしている。Shoham の成果は他の時制論理が抱えていた困難な部分をいくつか解決した。

時間データベース

具体的にデータベースに根ざした時制論理の研究として Dean, Mcdermott (1988) ”Temporal Data Base Management”は不完全な時間情報のデータベースを矛盾のないように更新するための技法について研究し、そのデータベースはタイムマップと呼ばれイベントの発生や終了を表す点と点同士の拘束条件を表す枝からなるグラフ構造をしており、また時間の論証維持機能を持っている。

GIS における Temporal Reasoning の導入

GIS においては Langran (1992) ”Time in Geographic Information System” [Lan92] の GIS における時間概念の導入の研究に始まり、GIS をベースにおいて推論の導入を試みている研究が見られ始めており、初期の頃のまとめとしては、Altaha, Barrera (1990) ”Temporal Data and GIS: An Overview”のレビューが上述の推論に関する基本的な機能がわかりやすくまとめられている。論文内でまとめられている Temporal DBMS に望む性質として、(1) Point と interval の両方を扱えるモデル、(2) 唯一のオブジェクトが違う状態を取っているのか、あるいはそもそも違うオブジェクトが存在しているのかを識別できるための object identity の存在、(3) 現在の Query 言語はアドホックなものなので、様々な時間の perspective を統一的に扱えること。(4) Generalization の取り扱い (5) データベースのための Temporal Specification (6) Temporal Navigation のためのユーザーインターフェイス、などがあった。

最近の流れ

また、Causal Modeling を中心とした Geoffrey Edwards (1994) らの”Qualitative Causal Modeling in Temporal GIS”なども哲学者 Bunge の Causality (1966) の定義に基づき、Causal Model の Spatial である GIS への適用を試みており、概念的なモデルまでは提案している。近年では Andrew Frank など (1995) ”Qualitative Spatial Reasoning: Cardinal Directions as an Example”など空間的な推論に関する研究も見られる。

時空間表現に関する研究の流れ

時空間表現に関する研究は CG の分野では、[黒木 98, Cam90, Gla] などに見られるものの、GIS の分野との違いは実世界を計測したデータの存在の有無である。GIS は実世界を対象としているために対象が

多様、多量、複雑である。従って、各用途に応じた計測データの特質に基づかざるを得ないことが多い。GISの分野でも近年データの更新に時間管理の概念を明示的に含ませた研究が見られるようになってきている [大沢 98, 飯村 98, 亀田 98]。

A.2 地理情報における標準化活動の現状

GISの分野では各ソフトウェア独自のフォーマットで空間データが整備されることが多かった。新規性を出すという面では独自のデータ属性があることは肯定すべきことであるものの、それによりデータの相互運用性に支障をきたすのは問題である。そこで基本的な考え方を標準化しようという流れが高まってきた。いくつかの標準化の詳細は [国土 99, 柴崎 96, 柴崎 99] 等を参考にしたい。それら標準化を例えば XML 等の言語で実装することにより、相互運用性が高まりつつ、データ作成の自由度も持たせることが可能になる。本研究では実用面と時間の都合上、ISO/TC211 地理情報の標準化における空間スキーマと時間スキーマを参考としてパッケージを構築し、さらに [太田 99] 等を参考に時空間スキーマに基づくパッケージに拡張した。以下の節では、A.3.1 で SpatialSchema の Geometry に基づく幾何形状パッケージ、A.3.2 で SpatialSchema の Topology に基づく位相形状パッケージ、A.3.3 で時間パッケージ、A.3.4 で時空間パッケージについて述べる。本研究では、ほとんどの処理が図形の表現、図形同士の交差判定、包含判定等の処理に還元されるために最終的にはこの部分に委ねられているようになっている。

A.3 四次元ライブラリパッケージの構築

A.3.1 空間における幾何形状パッケージ

まず、SpatialSchema に基づく幾何形状パッケージ構築について述べる。全体構成は図 A.1 の UML 図のようになっており*1, GM_Object インターフェイスでは各 Geometry で共通となるメソッドを定義し、それを GM_Primitive と GM_Complex で継承する。前者は基本となる形状単体を指し、後者はいくつか複合したものを意味する。本研究では前者を重点的に整備し、GM_Primitive を実装した GM_Point, GM_Curve, GM_Surface, GM_Solid を構築した。それを表現したものが図 A.2 であり、各説明を次に行う。

GM_Point

GM_Point は位置を表現する 0 次元の幾何プリミティブであり、x 座標値、y 座標値、z 座標値を持つ。

*1 UML の表記法は、上段：クラス名、中段：データ名、下段：メソッド名、となっている。データのコンパートメントは { ビジビリティ データ名 : 型 } を表し、メソッドのコンパートメントは { ビジビリティ メソッド名 (パラメータリスト) : 返り値型 } である。ビジビリティは可視性を表す public, private, protected のいずれかを選択する。白抜きの矢印はサブクラスからスーパークラスに向けられるジェネライゼーション (generalization: 汎化) を表す。また [] となっているのは配列を意味し、複数のオブジェクトを意味する。

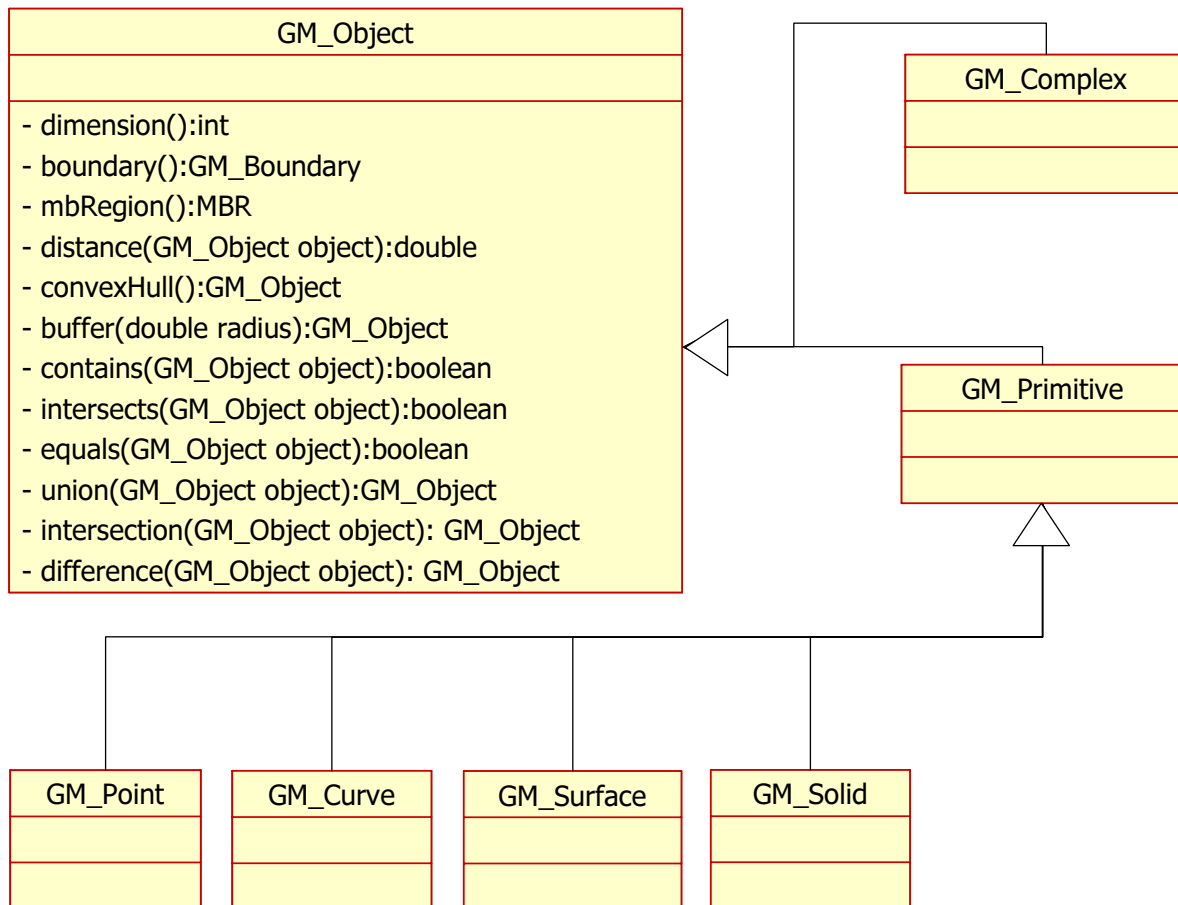


図 A.1: 空間における幾何形状パッケージ

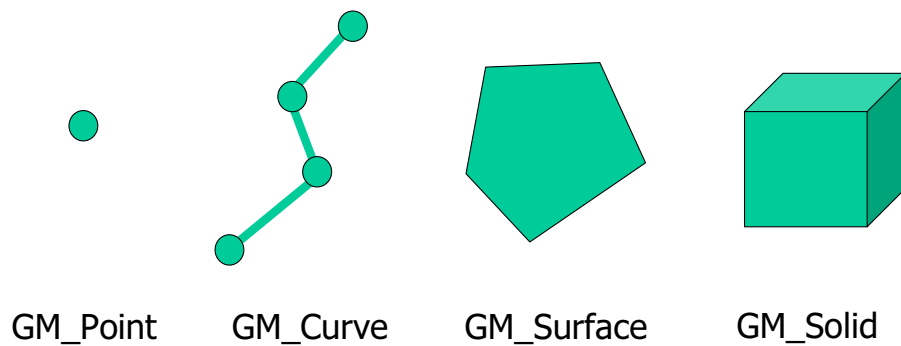


図 A.2: 基本的な幾何形状

GM_Curve

GM_Curve は連続的な線を表す 1 次元幾何プリミティブであり、一様な線分を表す GM_CurveSegment 群から構成される。

GM_Surface

GM_Surface は連続した有限な平面を表す 2 次元の幾何プリミティブであり、一様な平面を表す GM_SurfacePatch 群から構成される

GM_Solid

GM_Solid は連続したユークリッド 3 次元空間を表す 3 次元幾何プリミティブであり、連結した GM_Surface を表す GM_Shell で、外部と内部を定義されたものである。

GM_Object

GM_Object では各 Geometry で共通となるメソッドを定義している。dimension は次元を返し、boundary は自身の境界を返す。mbRegion は自身を含む最小の長方形、直方体等を返し、distance は他の図形との距離を返し、convexHull は凸包体を返す。buffer はバッファを形成し、contains はある図形を包含するかどうか判定する。intersects は交叉するかどうか、equals は等価かどうかの判定を行う。また union, intersection, difference はそれぞれの和、交差部、差、の部分を取得する。なお、本研究では、必要上 distance, intersect, contains, equals を優先的に構築したため、他では一部不完全な所がある。

また intersects, contains 等、判定メソッドのインプリメントの方針として、「三次元空間中の問題を回転変換で二次元空間の問題に縮退させ、従来の二次元空間中の判定方法を使い判定する」こととした。二次元空間中の包含、交差、距離の計算に関しては、[伊理 97, M. ド 00] を参考にしている。

A.3.2 空間における位相形状パッケージ

次に SpatialSchema に基づく位相形状パッケージ構築について述べる。全体の構成は図 A.3 のようになり、TP_Object インターフェイスでは各 Topology で共通となるメソッドを定義し、それを TP_Primitive と TP_Complex で継承する。前者は基本となる形状単体を指し、後者はいくつか複合したものを意味する。本研究では前者を重点的に整備し、TP_Primitive を実装した TP_Node, TP_Edge, TP_Face, TP_Solid を構築した。それを表現したものが図 A.4 であり、各説明を次に行う。

TP_Node

0 次元の位相プリミティブであり、双対境界に TP_Edge を持つ。

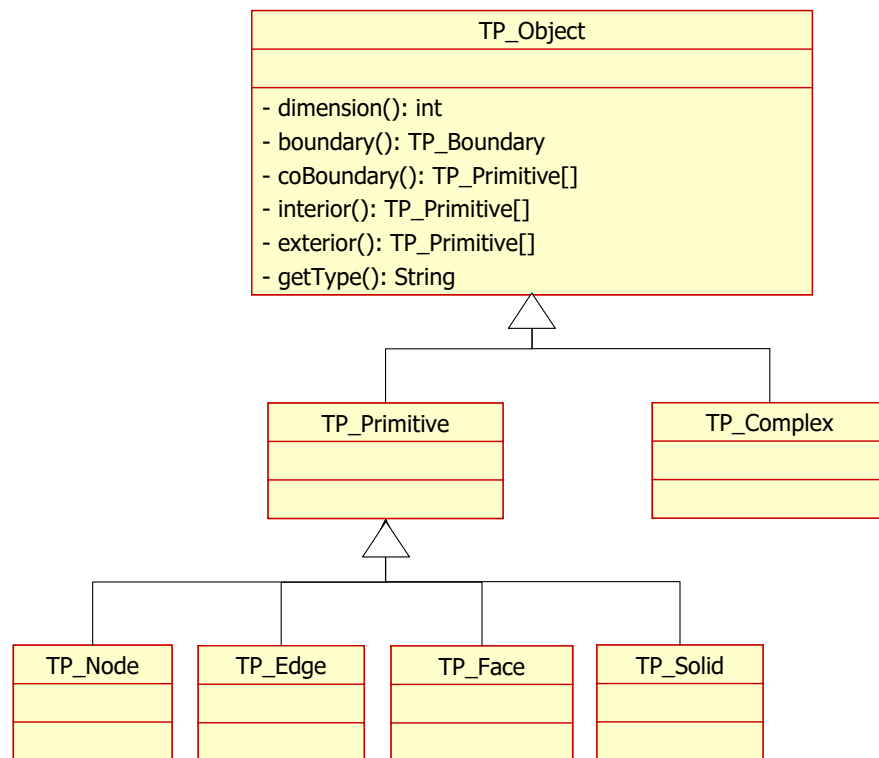


図 A.3: 空間における位相形状パッケージ

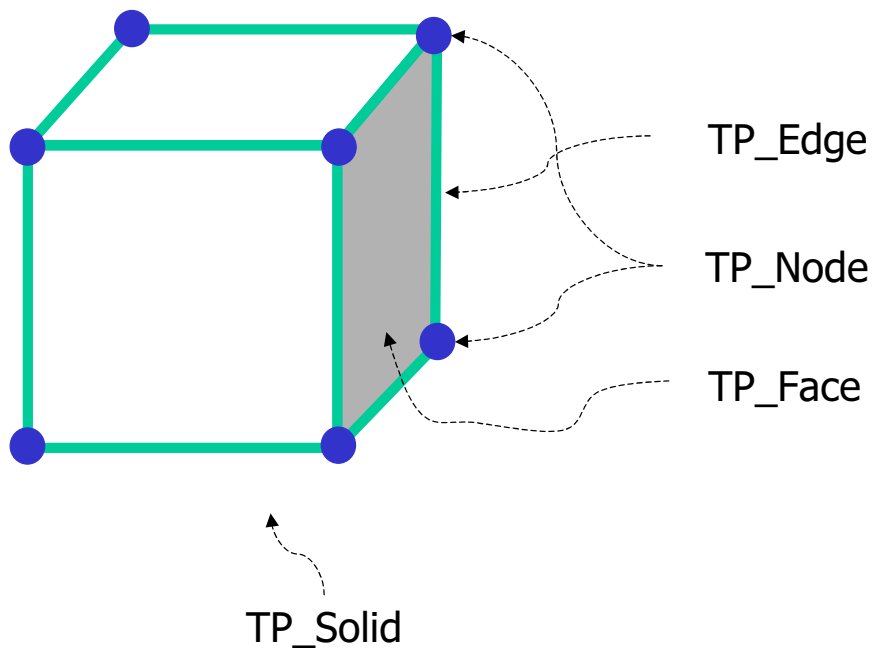


図 A.4: 基本的な位相形状

TP_Edge

1 次元の位相プリミティブであり、境界に TP_Node, 双対境界に TP_Face を持つ。

TP_Face

2 次元の位相プリミティブであり、境界に TP_Edge, 双対境界に TP_Solid を持つ。

TP_Solid

3 次元の位相プリミティブであり、境界に TP_Face を持つ。

TP_Object

TP_Object では各 Topology で共通となるメソッドを定義している。dimension は次元を返し、boundary は自身の境界を返す。coBoundary は自身を境界とする自身より高次元の双対境界を返す。また interior は内部を返し（境界は含まない）、exterior は外部を返す（境界は含まない）。

A.3.3 時間パッケージ

TemporalSchema に基づく時間パッケージの構築について述べる。全体の構成は図 A.5 のようになっている。時間は TM_Object インターフェイスに対して、0 次元の TM_Instant, 1 次元の TM_Period のみとなる（図 A.6）。また時間の相互関係は図 A.7 のように 7 通りが定義されている。

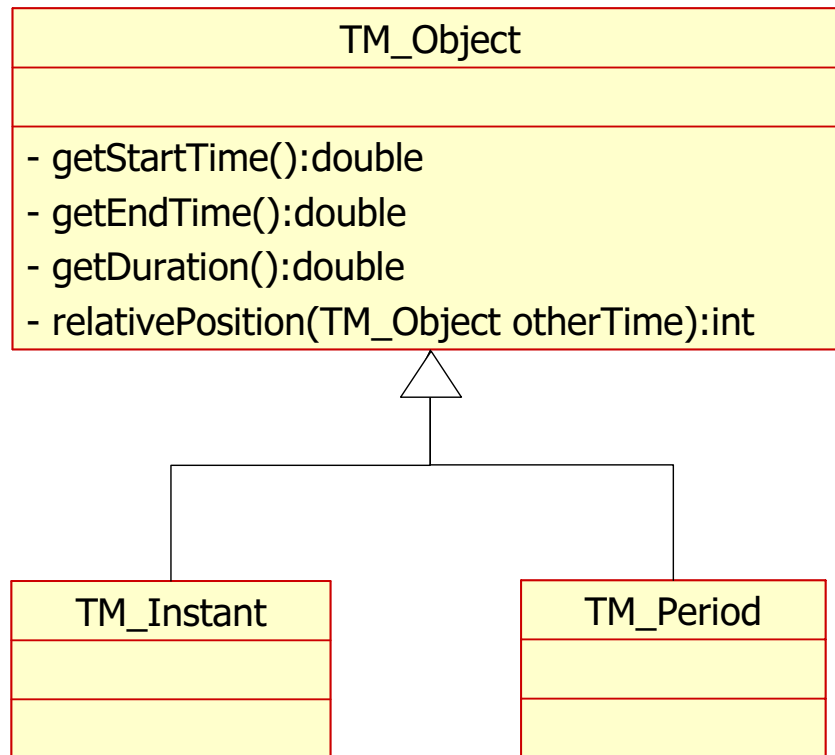


図 A.5: 時間における幾何形状パッケージ

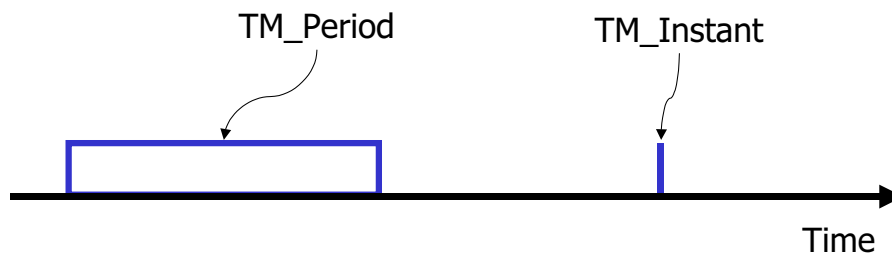


図 A.6: 時間の基本的な幾何形状

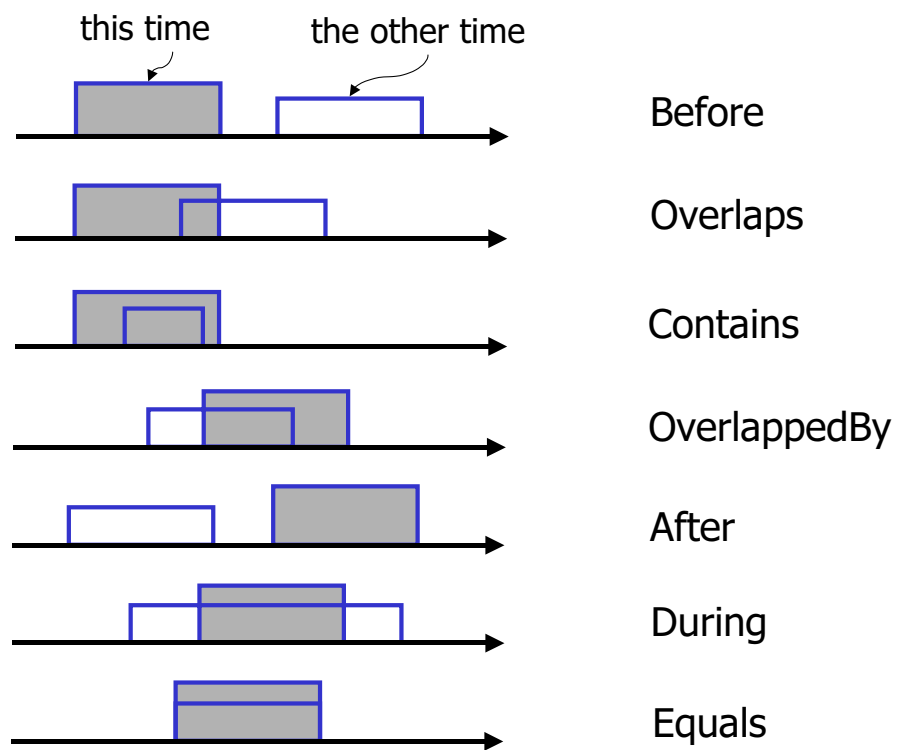


図 A.7: 時間の相互関係

A.3.4 時空間パッケージ

最後に時空間パッケージに関しては図 A.8 のようになっており、時間と空間を一オブジェクトずつ持つ。時間と空間の組み合わせはそれぞれ存在するので 8 種類の時空間クラスを持つ。本研究のような時空間について扱う研究の場合はこれが基本単位となる。例えば、SurfaceInstant であれば航空写真計測の時空間範囲を表現するのに適しており、CurvePeriod であればトラフィックカウンター計測の時空間範囲を表現するのに適しており、また PointPeriod であれば、ある短い期間の人という地物の滞在位置を表現するのに適している（図 A.9）。

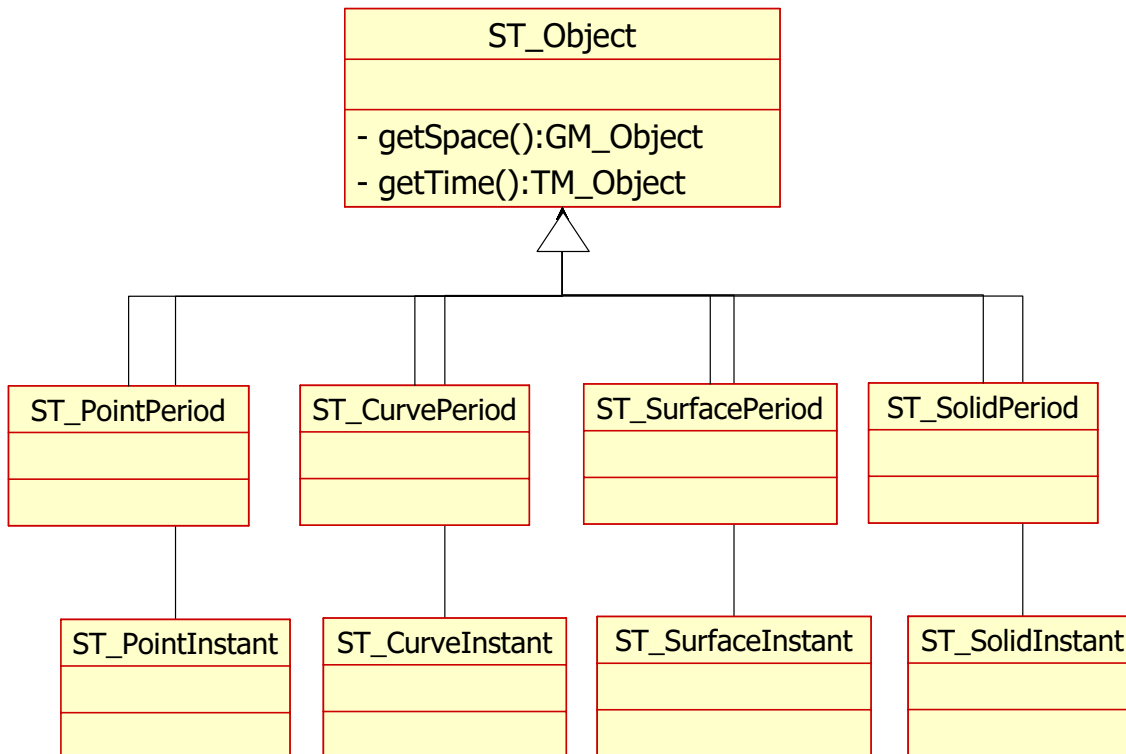


図 A.8: 時空間における幾何形状パッケージ

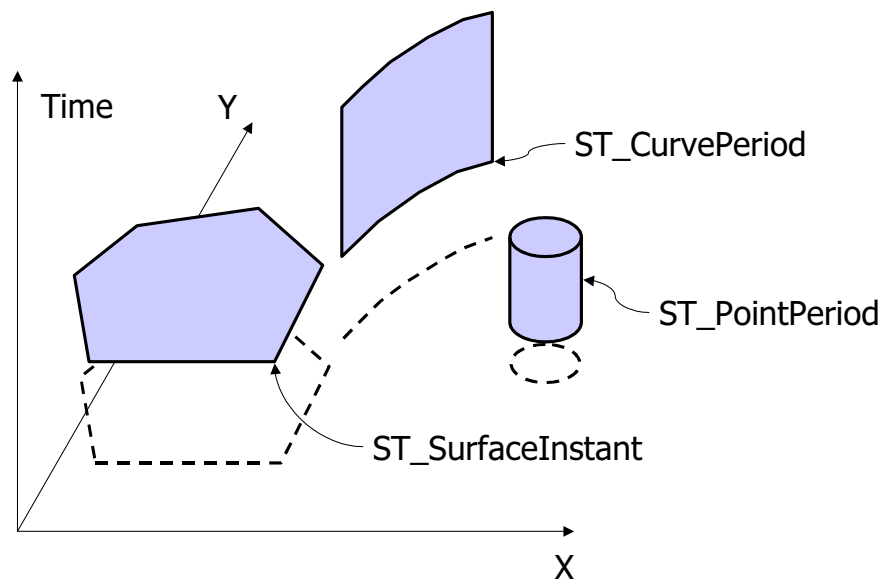


図 A.9: 基本的な時空間幾何形状

付録 B

システム詳細

ここでは本論文を行うために構築したシステムの詳細について述べる。

B.1 システム概要

システムの概要図を図 B.1 にまとめた。大きく分けるとまず、地物の観測を行う等の現象を起こす部分を
実世界生成パートで求める。また逆に、観測データや知識などから GA を使い地物を再構成する部分を
実世界再構成パートで行う。前者は主に地物 (feature)、観測 (observation)、イベント (event) などのパッケー
ジから構成され、後者は主に GA、観測 (observation)、地物 (feature)、知識 (knowledge) などのパッケー
ジから構成される。実用上それら以外のパッケージも存在する。

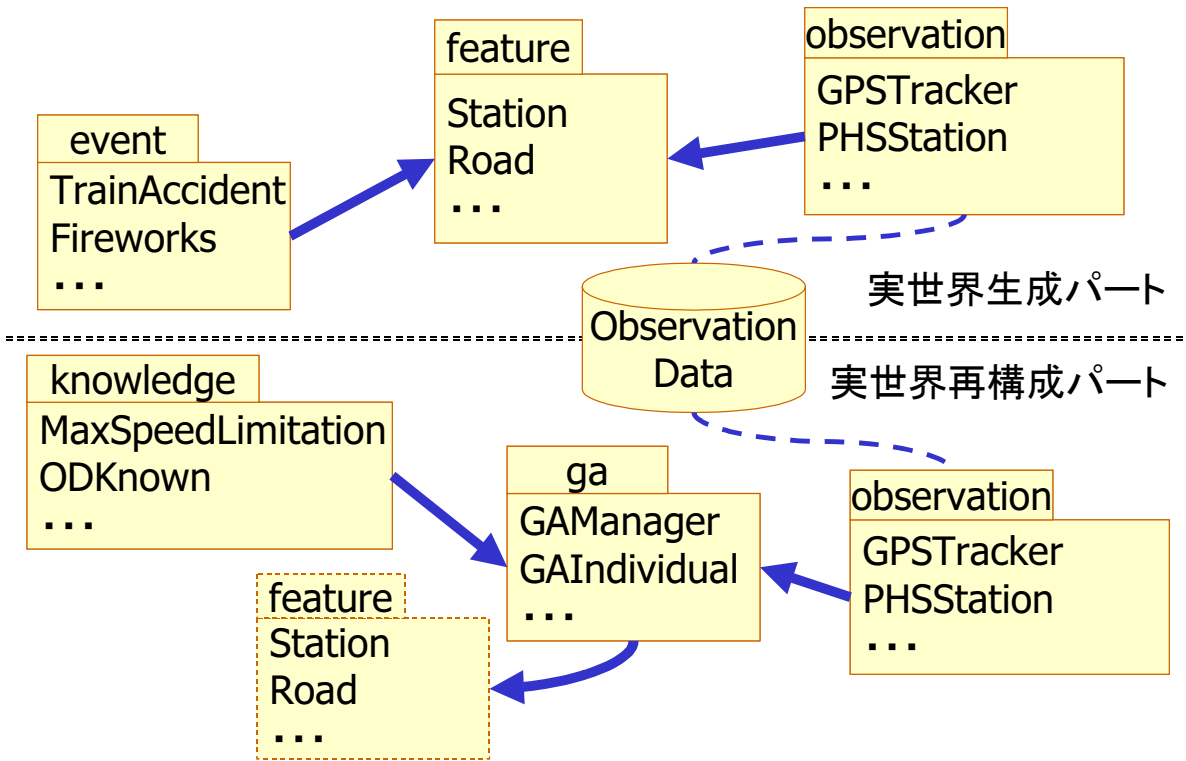


図 B.1: システムパッケージ図

以下では、まず B.2 でシステムが提供する機能を述べ、次に B.3 で各オブジェクトの構築について、さらに B.4GA で再構成を行うシステムについて述べ、最後にその他のいくつかの機能を述べる。紙面の都合上、とくに重要なクラスとアルゴリズムのみにふれることとする。

B.2 システムが提供する機能

B.2.1 観測をシミュレートする

まず、観測をシミュレートする機能について述べるが、手順としては、

1. 真値オブジェクトの構築
2. 観測オブジェクトの構築
3. 観測のシミュレート

の手順で行われる。各オブジェクトの構築は各オブジェクトのデータファイルから行われ、観測データもファイルに出力される。その手順を示したサンプルコードを以下に示した。各オブジェクトの構築については次節で述べる。

観測シミュレーションサンプルコード (STObservationManager.java)

```
package crecon.observation;

import java.io.*;
import crecon.observation.*;
import crecon.param.*;
import crecon.feature.*;

public class STObservationManager {
    private File[] _preObsFiles;
    private File[] _trueFeatureFiles;

    public STObservationManager(Parameter param) {
        _preObsFiles=param.getParamObject().getPreObservationFiles();
        _trueFeatureFiles= param.getParamObject().getTrueFeatureFiles();
    }

    // 実際に観測プロセスを行うメソッド
    public void process(){
        // 観測前の観測オブジェクト構築
        System.out.println("Constructing Observation Objects...");
        GObservation[] observations
            =ObservationFactory.createObject(_preObsFiles);
        // 地物オブジェクト構築
        System.out.println("Constructing True Feature Objects...");
        GFeature[] trueFeatures= new GFeature[_trueFeatureFiles.length];
        for(int i=0;i<trueFeatures.length;i++){
            trueFeatures[i]=Human.buildFromFile(_trueFeatureFiles[i]);
        }
        // 地物を観測し、観測データをファイルに書き出す
        System.out.println("Now Observing True Feature Objects...");
        for(int i=0;i<observations.length;i++){
            observations[i].observe(trueFeatures);
            observations[i].exportObsData();
        }
    }

    public static void main(String[] argv){
        Parameter param = new Parameter(new File(argv[0]));
        STObservationManager obsManager = new STObservationManager(param);
        obsManager.process();
    }
}
```

B.2.2 再構成を行う

次に再構成を行う機能について述べるが手順は、

1. 観測オブジェクト、知識オブジェクト、真値オブジェクト構築
2. GA オブジェクト構築

3. GA 開始, 終了

4. 結果評価

となっているサンプルコードについては以下に示した。

GA を使い地物の再構成を行うサンプルコード (STGAManagerGA.java の一部抜粋)

```
public class STGAManagerGA {
    // 変数の宣言
    ....

    public STGAManagerGA(Parameter param){
        ....
    }

    // GA を一回行い、最適解を得る。
    public void processOneTime(){
        buildPreGAObjects(); // GA に用いるオブジェクトを構築する。
        buildGAObjects();    // GA の操作を行う各オブジェクトを構築する。
        GAPopulation population = generator.generatePopulation(); // 個体群を初期生成する。
        for(int i=0;i<generationNum;i++){
            processOneGeneration(population); // 一世代ずつ操作を行う。
        }
    }

    private void buildGAObjects(){
        ...
        generator = new STGAGeneratorRR(.....); // 遺伝子生成オブジェクト構築
        evaluation = new STGAEvaluation(.....); // 遺伝子評価オブジェクト構築
        mutation    = new STGAMutation(.....); // 突然変異オブジェクト構築
        scaling      = new GAScaling(.....);    // スケーリングオブジェクト構築
        selection1   = new GASelection(.....); // 淘汰オブジェクト構築
        selection2   = new GASelection(.....); // 淘汰オブジェクト構築
        crossover    = new GACrossOver(.....); // 交叉オブジェクト構築
        if(_paramGA.getSAFlag()) sa= new SA(.....); // SA オブジェクト構築
        if(_paramGA.getHCFlag()) hc= new HC(.....); // HC オブジェクト構築
    }

    private void buildPreGAObjects(){
        ....
        envFeatures= buildEnvFeatures(...); // 静的地物を構築
        observations=ObservationFactory.createObject(...); // 観測オブジェクトを構築
        knowledges = KnowledgeFactory.createObject(...); // 知識オブジェクトを構築
        trueFeatures = FeatureFactory.createObject(...); // 真の地物を構築
        // ネットワークデータが必要な時は構築しておく
        if(_paramGeneral.getMCRCFlag()){
            networkFeatures = buildNWFeature();
            rmf = buildRouteMap(networkFeatures);
            for(int i=0;i<observations.length;i++){
                observations[i].setRouteMapFactory(rmf);
            }
            ....
        }

    }

    private void processOneGeneration(){
        // 後に記述
    }

    public static void main(String[] argv){
        Parameter param = new Parameter(new File(argv[0]));
        STGAManagerGA managerGA = new STGAManagerGA(param.getGAParameter());
        managerGA.processOneTime();
    }
}
```

B.2.3 時空間データを表示する

時空間データ表示の機能は

1. 再構成結果画像の自動生成
2. ファイルデータから動画の再生

からなる。前者はGAの結果をトラジェクトリとして、すぐ確認することができる。後者は地物の時空間位置を記述したファイルからアニメーションとして表示することができる。一つの使い方として、GAを何回も行い画像で結果を確認し(図B.2), よい結果が得られたものについては、そのデータファイルを読み込み、アニメーションとして表示して確認することが可能である。なお、ここではアニメーションのパフォーマンス上の静的地物(図B.3,B.4)と動的地物(図B.5,B.5)を分けて読み込んだ。各地物のデータファイルとその構築方法については次節で述べる。またエリアごとの滞在人数の時間変化について把握することも本研究では重要だったので、図B.7のようにエリアごとの人数を色の濃淡で表示し時間変化していく様子をアニメーション表示可能とした。

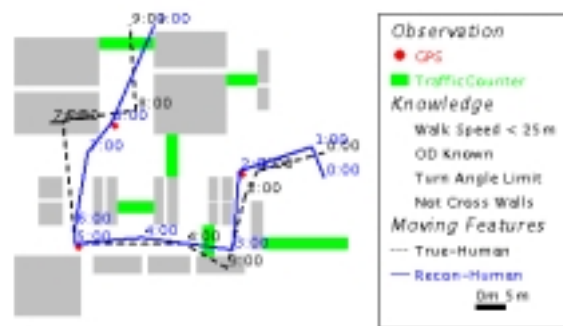


図 B.2: 結果画像の自動生成

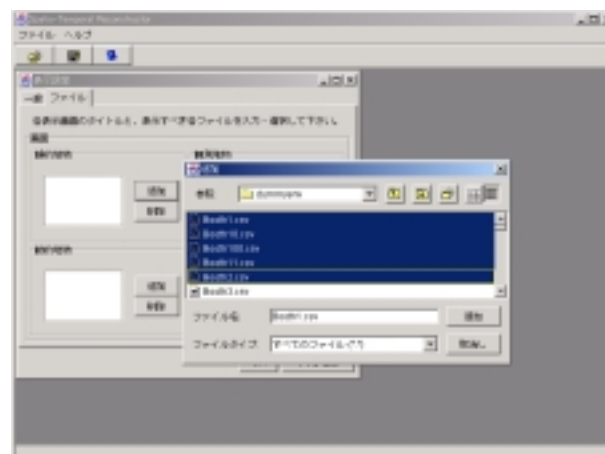


図 B.3: 静的地物オブジェクトデータファイルの選択

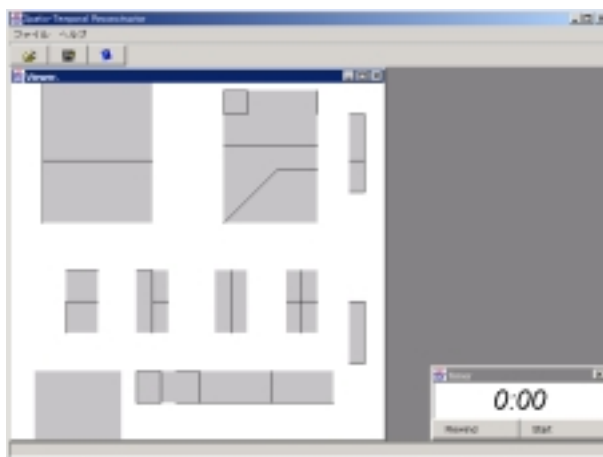


図 B.4: 静的地物オブジェクトの表示

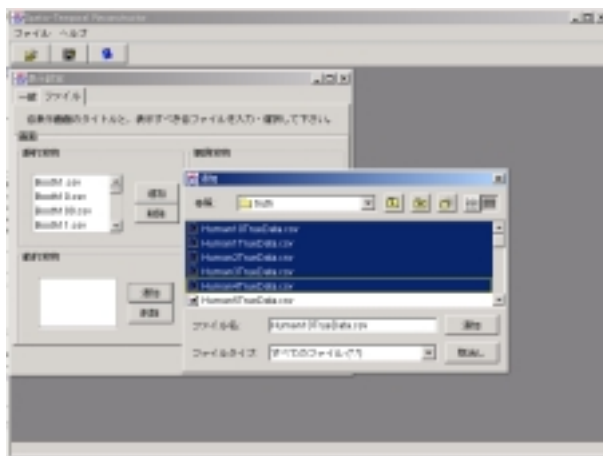


図 B.5: 動的地物オブジェクトデータファイルの選択

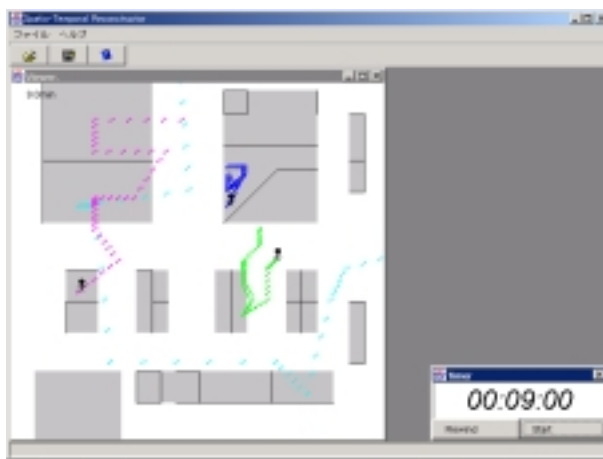


図 B.6: 動的地物のアニメーション表示

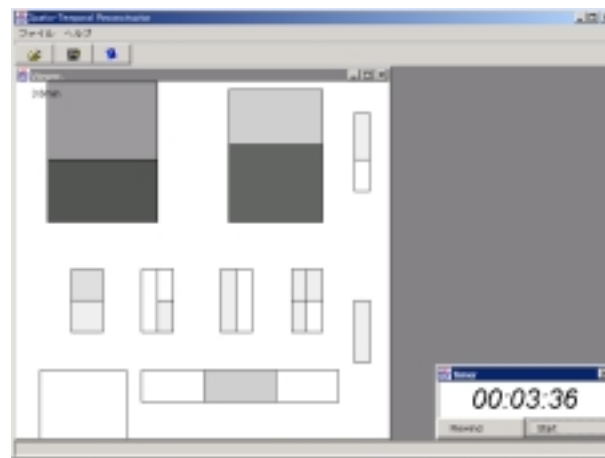


図 B.7: エリアごとの人数を色で表示

B.3 各種オブジェクトに関するパッケージ

ここでは各種オブジェクトに関するパッケージについて述べる。またイベントに関するパッケージは今回実装を行っていないので省いた。

B.3.1 地物に関するパッケージ

まず地物に関するパッケージに関しては、図 B.8 のような構成になっている。GFeature という地物インターフェイスに対して、たとえば Building, Human といった各地物を定義可能になっている。GFeature で定義しているメソッドとして、getName は”Taro”, ”Jiro” といった各オブジェクトの名前、getFeatureType は”Human”, ”Building” といった地物のタイプ名の取得を行う。そして、getStartTime, getEndTime では地物の生成時刻・消滅時刻を取得し、getGeometry では地物の代表的な幾何形状を、getAllGeometries では地物を構成する幾何形状がたくさんある場合、全てを取得する。また、getSTSequence では地物の時空間シーケンスを取得する。時空間位置に関する各種判定はここから取得された時空間シーケンスを用いて行う。

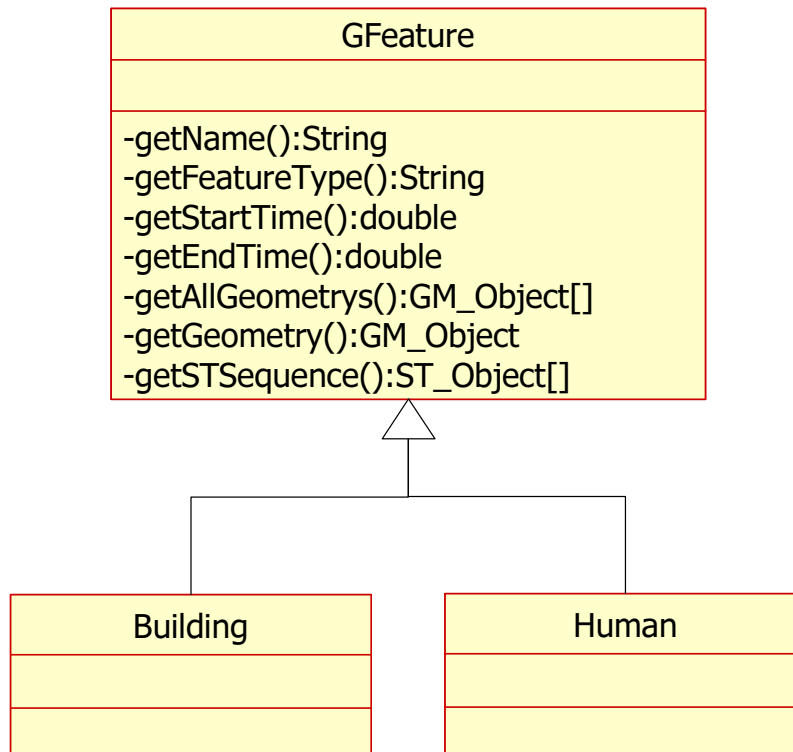


図 B.8: GFeature のインターフェイス

次に、地物の構築と用意すべきデータファイルについて次に記した。本研究では地物のタイプに応じてデータを読み込むコードを実装でき (buildFromFile メソッド), それに応じた各地物タイプ固有のデータをファイル (Human1.csv) に用意しておくことも可能である。データファイルにおいては###を行頭に記述したものを地物のメタデータとし、ないものは地物の時空間データ列とした (***)についてはコメントアウト

行である)。メタデータに関しては1列目はメタデータ名であり、2列目は実際に読み込まれるメタデータである。時空間データはこの場合はt,x,y,zの順にデータが並んでいる。

データファイルからの地物オブジェクトの構築 (Human.java より一部抜粋)

```
public class Human implements GFeature, Visible, Mobile{
    // 変数の宣言
    .....

    public Human(String name, double startTime, double endTime, double timeResolution,
                  double existingTimeRange, TM_Object[] times, GM_Object[] spaceArray){
        .....
    }

    .....

    public static Human buildFromFile(File dataFile){
        DataFileReader reader = new DataFileReader(dataFile);
        // ヘッダからの構築
        String header = reader.getHeaderCSV();
        StringTokenizer st = new StringTokenizer(header, ",");
        String name      = st.nextToken();
        double startTime  = Double.parseDouble( st.nextToken() );
        double endTime    = Double.parseDouble( st.nextToken() );
        double timeResolution = Double.parseDouble( st.nextToken() );
        double timeRange   = Double.parseDouble( st.nextToken() );
        // データからの構築
        String[] dataArray = reader.getLineDataCSVArray();
        int size = dataArray.length;
        TM_Object[] times = new TM_Object[size];
        GM_Object[] spaces = new GM_Object[size];
        for(int i=0; i<size; i++){
            StringTokenizer st1 = new StringTokenizer(dataArray[i], ",");
            double t = Double.parseDouble(st1.nextToken());
            double x = Double.parseDouble(st1.nextToken());
            double y = Double.parseDouble(st1.nextToken());
            double z = Double.parseDouble(st1.nextToken());
            times[i] = new TM_Period(t, t+timeRange);
            spaces[i] = new GM_Point(x, y, z);
        }
        return new Human(name, startTime, endTime, timeResolution, timeRange,
                          times, spaceArray);
    }

    public static main(String[] argv){
        Human human = Human.buildFromFile(new File("Human1.csv"));
    }
}
```

Human1.csv

```
###Name,Human1
###StartTime,0
###EndTime,10
###TimeResolution,1
###ExistingTimeRange,0.1
***t,x,y,z
0,43,31,0
1,44,21,0
2,41,19,0
3,33,19,0
4,33,27,0
5,30,31,0
6,25,30,0
7,25,19,0
8,19,19,0
9,13,19,0
```

B.3.2 観測に関するパッケージ

観測に関するパッケージに関しては、図 B.9 のような構成になっている。観測クラスは広義の地物に対して特化したものなので、GObservation インターフェイスは GFeature インターフェイスを継承している。observe は地物を観測するメソッドであり、成功した場合はオブジェクトに観測データを記憶させる。また getObsSTSchedule はメタデータから観測時空間範囲を取得するものであり、getObsSTSequence は取得された観測データと観測時空間範囲から実際に観測された時空間データを取得するものである。exportObsData は自身が持っている観測データをファイルに出力する。それらを実装することになるが、観測のタイプもいくつか存在し、それぞれのタイプに応じて効率よく処理ができるように抽象 (Abstract) クラスを用意し、実際の観測クラスはそのどれかを継承するのが良いと思われる。AbstractNumObservation は集計観測を抽象化したものであり、トラフィックカウンターのようなものがある。また、残りの3つは非集計観測であり、空間、時間、時空間を計測データとして得るもので分けた。例えば空間を計測したものとした GPS によるトラッキングなどがある。また観測オブジェクトの構築についても次のサンプルコードで

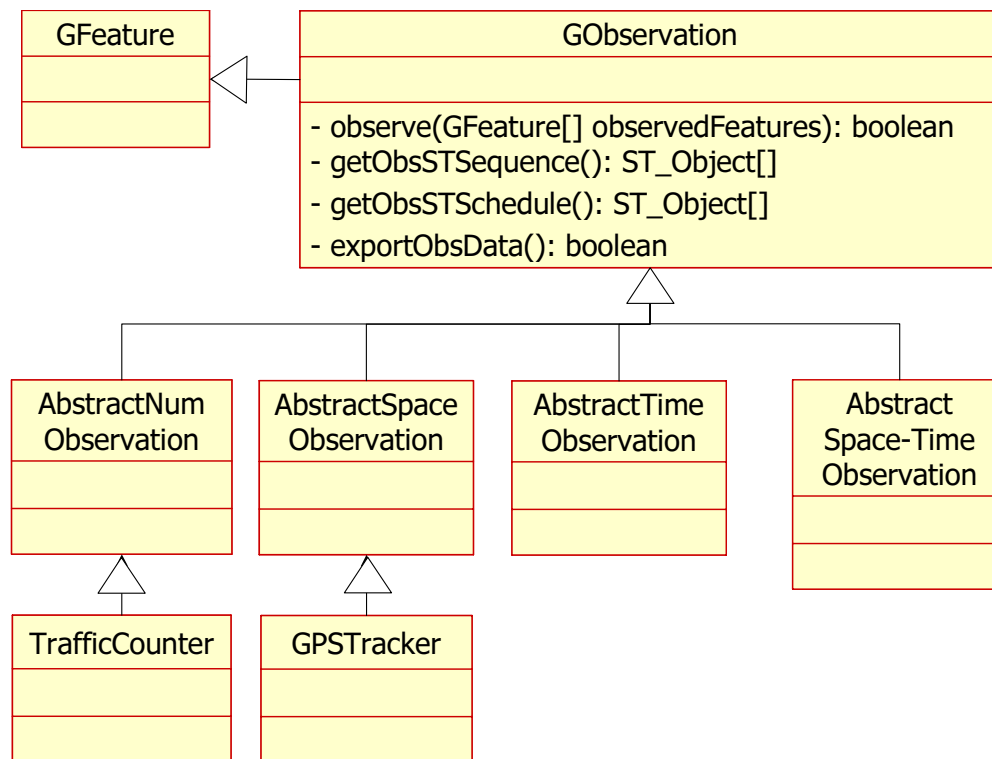


図 B.9: GObservation のインターフェイス

なされ、データファイルからこの場合は、オブジェクトの名前、開始終了時刻、観測の時間間隔、一回あたりの観測時間範囲、観測空間範囲データ、再構成か観測かのフラグ、観測データの出力ファイル、観測対象地物のタイプや観測時の地物の内挿モードあるいは誤差データなどを入力する。

データファイルからの観測オブジェクトの構築 (TrafficCounter.java より一部抜粋)

```
public class TrafficCounter extends AbstractObservationNoID implements Visible{
    // 変数の宣言
    ...

    public TrafficCounter(String id, double startTime, double endTime, double timeResolution,
        double timeRange, int spaceType, File spaceDataFile,
        int spaceDataIndex, boolean reconFlag, File obsDataFile,
        int[] numDataArray, int observedFeatureType,
        int observedIDType, int ipType, int errorType, File errorFile){
        ...
    }

    public static TrafficCounter buildFromFile(File dataFile){
        DataFileReader reader = new DataFileReader(dataFile);
        // ヘッダー読み込み
        String headerString=reader.getHeaderCSV();
        StringTokenizer st = new StringTokenizer(headerString, ",");
        String id = st.nextToken();
        double startTime = Double.parseDouble(st.nextToken());
        double endTime = Double.parseDouble(st.nextToken());
        double tResolution = Double.parseDouble(st.nextToken());
        double tRange = Double.parseDouble(st.nextToken());
        int spaceType = Integer.parseInt(st.nextToken());
        File spaceDataFile = new File(st.nextToken());
        int spaceDataIndex = Integer.parseInt(st.nextToken());
        boolean reconFlag = Boolean.valueOf(st.nextToken()).booleanValue();
        File obsDataFile = new File(st.nextToken());
        int observedFeatureType= Integer.parseInt(st.nextToken());
        int observedIDType = Integer.parseInt(st.nextToken());
        int ipType = Integer.parseInt(st.nextToken());
        int errorType = Integer.parseInt(st.nextToken());
        File errorFile = new File(st.nextToken());
        // 再構成時
        if(reconFlag){
            // データ読み取り
            String[] dataArray = reader.getLineDataCSVArray();
            int[] numDataArray = new int[dataArray.length];
            for(int i=0; i<dataArray.length; i++){
                numDataArray[i]=Integer.parseInt(dataArray[i]);
            }
            // オブジェクト構築
            return new TrafficCounter(id, startTime, endTime, tResolution, tRange,
                spaceType, spaceDataFile, spaceDataIndex, reconFlag, obsDataFile,
                numDataArray, observedFeatureType, observedIDType, ipType,
                errorType, errorFile);
        }else{
            ... // 計測時
        }
    }

    public static void main(String[] argv){
        TrafficCounter tc = TrafficCounter.buildFromFile
            (new File("TrafficCounter_Obs1.csv"));
    }
}
```

観測オブジェクトに関するデータファイル (TrafficCounter_Obs1.csv)

```
###NAME,TrafficCounter_1
###STARTTIME,0.0
###ENDTIME,10.0
###TIMERESOLUTION,1.0
###TIMERANGE,1.0
###SPACE_DATA_TYPE,2
###SPACE_DATA_FILE,d:\jbuilder3\myprojects\...\TrafficCounterMap.csv
###SPACE_DATA_INDEX,0
###RECON_FLAG,true
###OBSDATA_FILENAME,d:\jbuilder3\myprojects\...\TrafficCounter_Obs1.csv
###OBSERVED_FEATURE_TYPE,1
###OBSERVED_ID_TYPE,0
###INTERPOLATION_TYPE,1
###ERROR_TYPE,11
###ERROR_FILE,d:\jbuilder3\myprojects\...\PDFDConstantNum.csv
num,
0
0
1
0
0
1
0
1
0
```

B.3.3 地物に関する知識パッケージ

地物に関する知識のインターフェイスは図 B.10 のようになっている。すなわち、仮説選択肢とその生起確率がセットになって保持されている。また対象となる遺伝子を入力するとそれが該当する仮説選択肢を探し、その生起確率を返すメソッドをもつ。知識オブジェクトの構築についても次にサンプルコードを示し、データファイル例も添付した。最大分速に関する知識である KMaxSpeed.csv は選択肢数や仮説となる分速を入力し、さらに地物がその知識を遵守する確率も選択肢数分だけ与える。

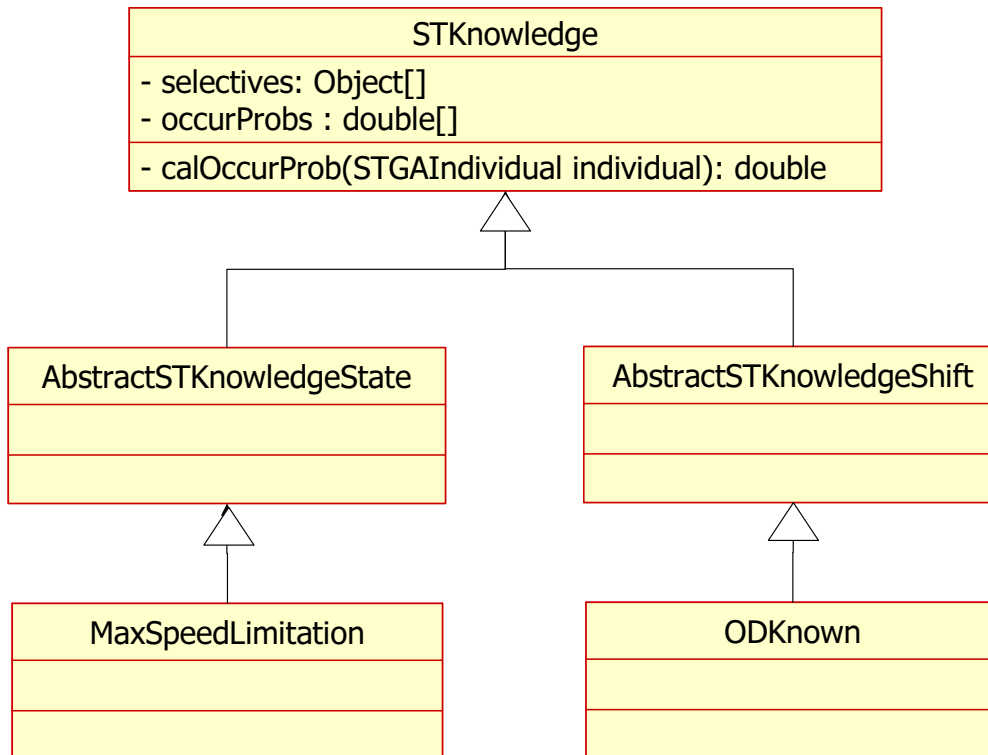


図 B.10: STKnowledge のインターフェイス

データファイルからの知識オブジェクトの構築 (KMaxSpeed.java からの抜粋)

```
public class KMaxSpeed extends AbstractSTKnowledgeShift implements Visible{
    // 変数の宣言
    .....

    public KMaxSpeed(int selectiveNum,int knowAttType,int ipMode,double baseSpeed,
                     double[] selectivePassProbs,double[]selectiveOccurProbs){
        .....
    }

    public ST_Object[] getEvaluatedObjects(STSet set,int index,int coverNum,
                                           int featureIndex){
        // 評価範囲をしぼる。
        ST_Object[] evaluateObjects = new ST_Object[coverNum];
        for(int i=0;i<coverNum;i++) evaluateObjects[i]=set.get(index+i);
        return evaluateObjects;
    }

    public double calShiftValue(ST_Object[] objects){
        // ... 1分あたりの移動距離を求める
        return moveRange;
    }

    public static KMaxSpeed buildFromFile(File file){
        DataFileReader reader = new DataFileReader(file);
        // ヘッダー部
        String header=reader.getHeaderCSV();
        StringTokenizer st = new StringTokenizer(header,",");
        int selectiveNum=Integer.parseInt(st.nextToken());
        int knowAttType=Integer.parseInt(st.nextToken());
        int ipMode=Integer.parseInt(st.nextToken());
        double baseSpeed=Double.parseDouble(st.nextToken());
        double[] selectivePassProbs = new double[selectiveNum];
        for(int i=0;i<selectiveNum;i++){
            selectivePassProbs[i]=Double.parseDouble(st.nextToken());
        }
        // データ部
        double[] selectiveOccurProbs = new double[selectiveNum];
        String[] dataArray = reader.getLineDataCSVArray();
        for(int i=0;i<selectiveNum;i++){
            selectiveOccurProbs[i]=Double.parseDouble(dataArray[i]);
        }
        return new KMaxSpeed(selectiveNum,knowAttType,ipMode,
                             baseSpeed,selectivePassProbs,selectiveOccurProbs);
    }

    public static void main(String[] argv){
        KMaxSpeed maxSpeed = new KMaxSpeed(new File("KMaxSpeedDataFile.csv"));
    }
}
```

KMaxSpeedData.csv

```
###SELECTIVE_NUM, 10
###KNOW_ATTTYPE, 0
###IP_MODE, 0
###BASE_SPEED, 20
###SELECTIVE_PASSPROB0, 1
###SELECTIVE_PASSPROB1, 0.9
###SELECTIVE_PASSPROB2, 0.8
###SELECTIVE_PASSPROB3, 0.7
###SELECTIVE_PASSPROB4, 0.6
###SELECTIVE_PASSPROB5, 0.5
###SELECTIVE_PASSPROB6, 0.4
###SELECTIVE_PASSPROB7, 0.3
###SELECTIVE_PASSPROB8, 0.2
###SELECTIVE_PASSPROB9, 0
0.999999
0.0000009
0.00000009
0.000000009
0.0000000009
0.00000000009
0.000000000009
0.0000000000009
0.00000000000009
0.000000000000009
0.000000000000001
```

B.3.4 共通となるインターフェイス

さらに上述のオブジェクトについてはいくつかの機能を実装することが可能である。本システムでは表示が可能となる Visible インターフェイス、自分自身の位置座標を更新する Mobile インターフェイス、また、周囲の経路マップを持っており、自分自身で参照することが可能である RouteSearchable インターフェイスを用意した。RouteSearchable インターフェイスに関しては次章の経路探索で得られた最短経路を各 OD ごとに登録したマップを参照することができる。

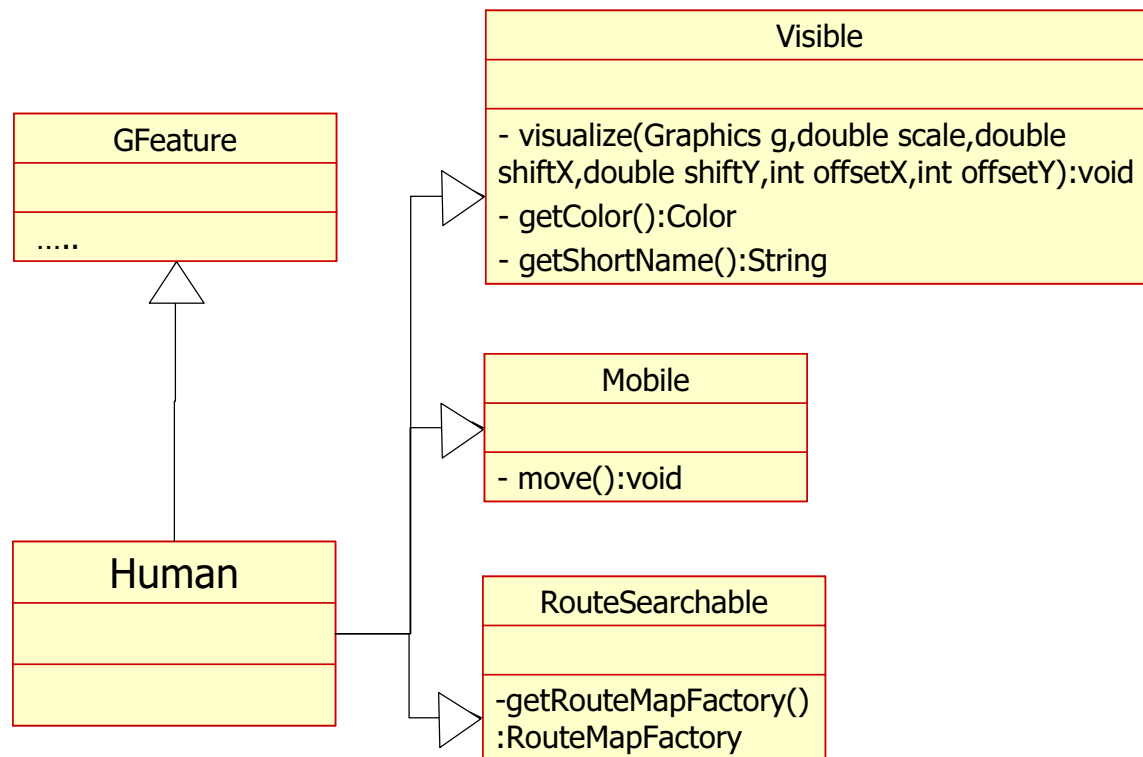


図 B.11: オプションとして実装可能なインターフェイス

B.4 GA に関するパッケージ

次に、構築したオブジェクト群を用いて GA を行うパッケージについて述べる。まず各種操作の対象となる遺伝子のインターフェースについては図 B.12 で表される。まず汎用的な遺伝子クラスが存在し (GAIndividual), それから遺伝子に時空間情報を持つクラス (STGAIndividual) が継承する。そして、遺伝子の表現の仕方もいくつかあるので、ラグランジェ表現したもの (STGAIndividualLagrange), オイラー表現したもの (STGAIndividualEuler) 等に分類しそれぞれで効率化をはかる。

GAIndividual における setGene は個体内のインデックス単位で遺伝子をセットすることができ、また deepCopy では個体全体をコピーすることも可能である。また STGAIndividual の getIndividualType では上で述べたような遺伝子表現法を取得でき、getSTSequence では個体から特定 ID に関する時空間シーケンスを取得でき各種判定時に使うことができる。たとえば、ラグランジェ表現時では特定の ID の地物の時空間シーケンスを取得でき、オイラー表現時では特定の ID の場所における時空間シーケンスを取得できる。

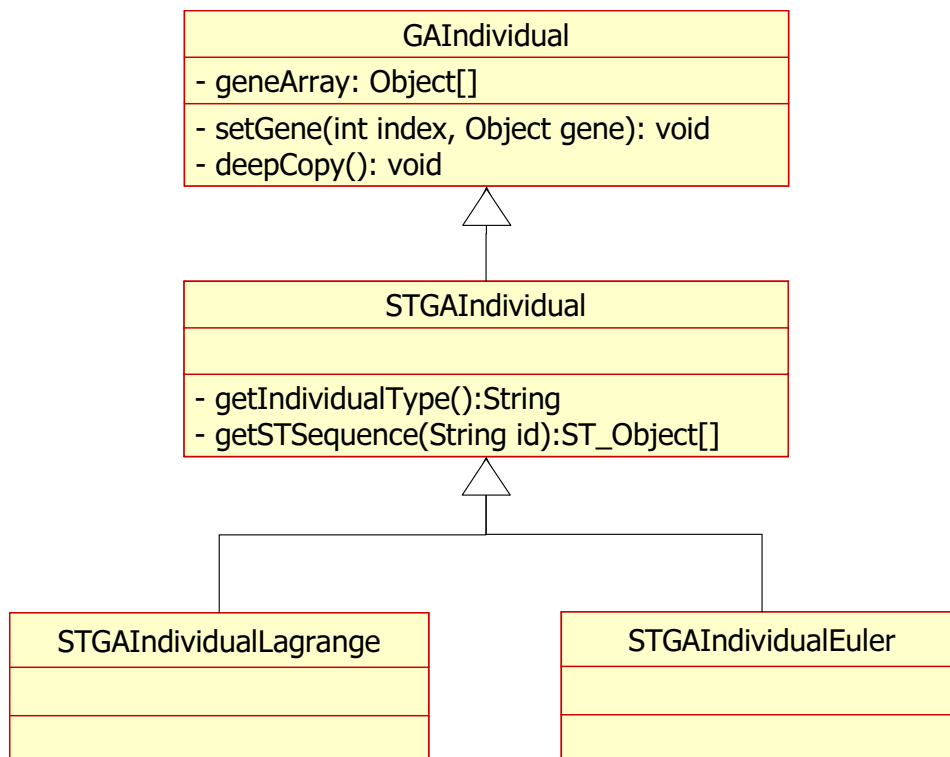


図 B.12: 遺伝子のインターフェイス

B.5 その他のパッケージ

その他のパッケージとしては,

- 確率分布パッケージ
- 視覚化パッケージ
- 最短経路探索パッケージ
- パラメータパッケージ

などがあるが, 詳細はここではふれない。

付録 C

複数の交通モードの変化を考慮したマルチモーダルな最短経路探索

C.1 目的

今まで、最短経路探索は主にカーナビのように車両等の経路選択に用いられることが多かった。しかし、近年、人間の時空間位置を知ることに対するニーズは高く、人間の移動のための経路探索を考察することは十分に意義があると考えられる。しかし人間は車と異なりかなり自由度のある移動が可能であるために、現実に対応するためにはより様々な要素を考慮に入れる必要がある。たとえば都市内での1日の行動という意味では、家から駅まで歩いたり、電車に乗っていたり、職場で座っていたりと様々な交通モードが組み合わさっている。あるいはデパートや展示場のような建物のフロアでも、興味のある場所で立ち止まったり、興味がない場所では素通りしたりと様々な交通モードの組み合わせである。従って本研究では満たすべき要件として、

- 複数の交通モードを考慮したマルチモーダルであること
- 異なるモード間でのモードの変化に対するコストを明示的に考慮したインターモーダルであること

とする。

またそれ以外でも重要な要件がある。ダイクストラ法など従来の最短経路探索法 [伊理 95] は、選択ノードに保持されているコストとそこから接続している更新ノードまでのコストの和で更新すべきかどうか評価するために、選択ノードに入ってくる交通モードが更新ノードに向かうモードと異なるかどうかでコストの計量の仕方が異なってくる。これは電車の初乗り料金システムのような、出発地からの距離がコストに関わるものを反映させにくい。たとえば、今 B 駅から C 駅に X 鉄道で移動するときのコストを評価したい時、A 駅から B 駅まですでに X 鉄道で来ていれば、B から C は 0 円、A 駅から B 駅まで徒歩で来ている場合は、B 駅から C 駅までは X 鉄道で初乗りなので 160 円となり、B 駅までのモードにより B 駅から C 駅までのコストが異なる。このように、コストはリンク間の積み重ねだけではなく、起終点と交通モードの組み合わせで認知されることも多くそれに対応することも重要である。

C.2 提案する方法

以上のような目的のもとに、本研究では各モード毎にノード・リンクを生成し、地物の接続情報に基づき同一モード間のみで移動可能としたネットワークを形成し、また同一地物内に限り、異なるモード間で乗

換可能としてネットワークを接続するアプローチを取る（図 C.1）。

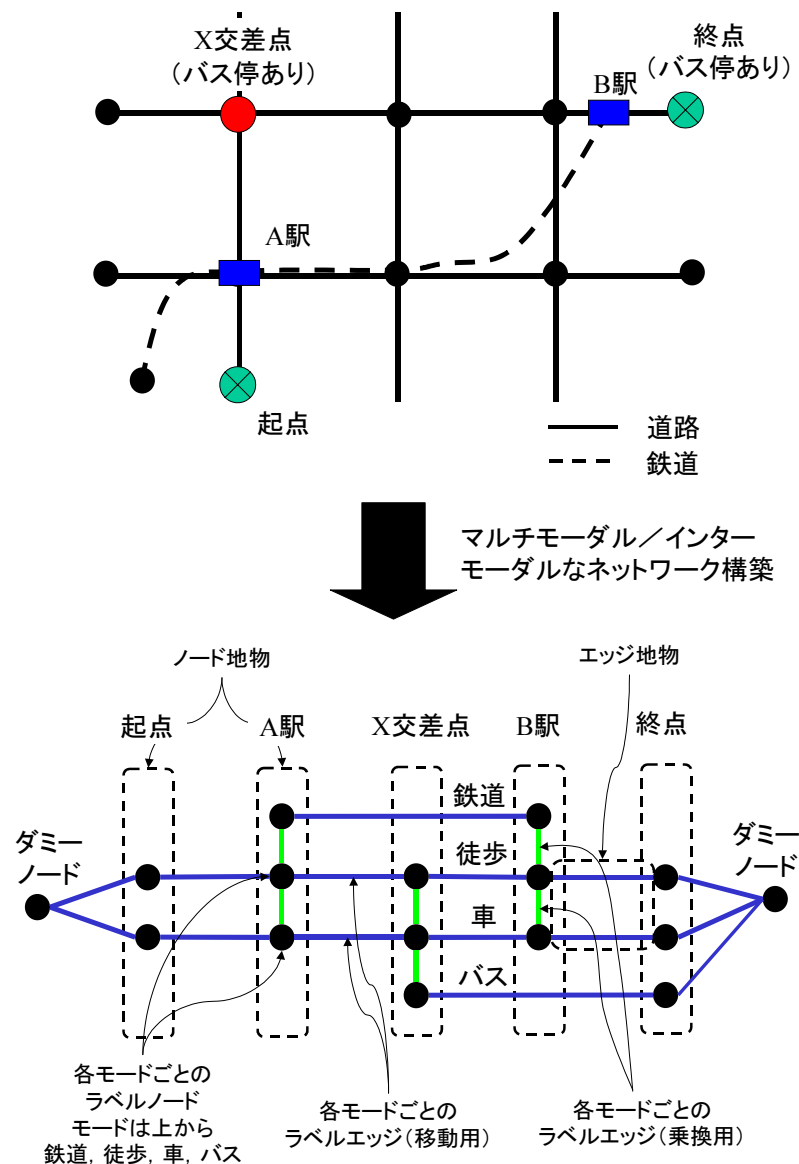


図 C.1: 地物表現したネットワークとインターモーダルなトポロジー表現したネットワークの対応

そしてラベル更新のルールは,

1. 選択ノードから同一モードの到達可能ノードは全て更新してしまう。
2. 選択ノードから同一地物内の乗換可能なラベルも更新する。

とし詳細のアルゴリズムは図 C.2 にまとめた。

まず接続情報を保持したノード型地物やエッジ型地物から各モードごとのラベルノードやエッジ（リンク）を生成し、起終点を決めそれにダミーノードを付加しネットワークを構成し、ダイクストラ法のように、ラベルノードを起点側のダミーノードのラベルのみ 0、それ以外を全て ∞ として初期化する。そして

一つずつ一時ラベル群から最小コストのラベルノードを選択し、そこから同一モードで到達可能なラベルノードを更新していき、また、同一地物内で乗換可能なラベルノードも更新しようとする。実際に更新は選択ノードのコストと各ノードへの移動コストが各ノードのコストを下回っていればラベルは更新されて各ノードはコストと接続するリンクを保持する。それを繰り返し全てのラベルが永久化されたら、終点から接続するエッジをつないでいくことにより通過交通モードつきの最短経路が得られる。

また以上のアルゴリズムに基づきラベルを更新していく状況を図 C.3 に記述した。ここでは上から鉄道、徒歩、車、バスのモード順で書いているが、起点周辺では徒歩のコストが小さかったものの、だんだん起点から離れるにつれ、車、あるいは徒歩+鉄道のモードの方がコストが小さくなる様子がわかる。この場合は最終的に終点までは車が一番コストが小さく、その次が徒歩+鉄道になっている。

毎回到達可能ノードを全て更新しようとするのが計算時間的に高コストである時は、選択ラベルが、そこに至るまでの同一モードの出発地を保持していれば、同一モードで接続しているノードのみ更新すれば十分となりコストを低減できる可能性があるが、ラベルがもつべき情報とアルゴリズムがやや複雑になってしまう。

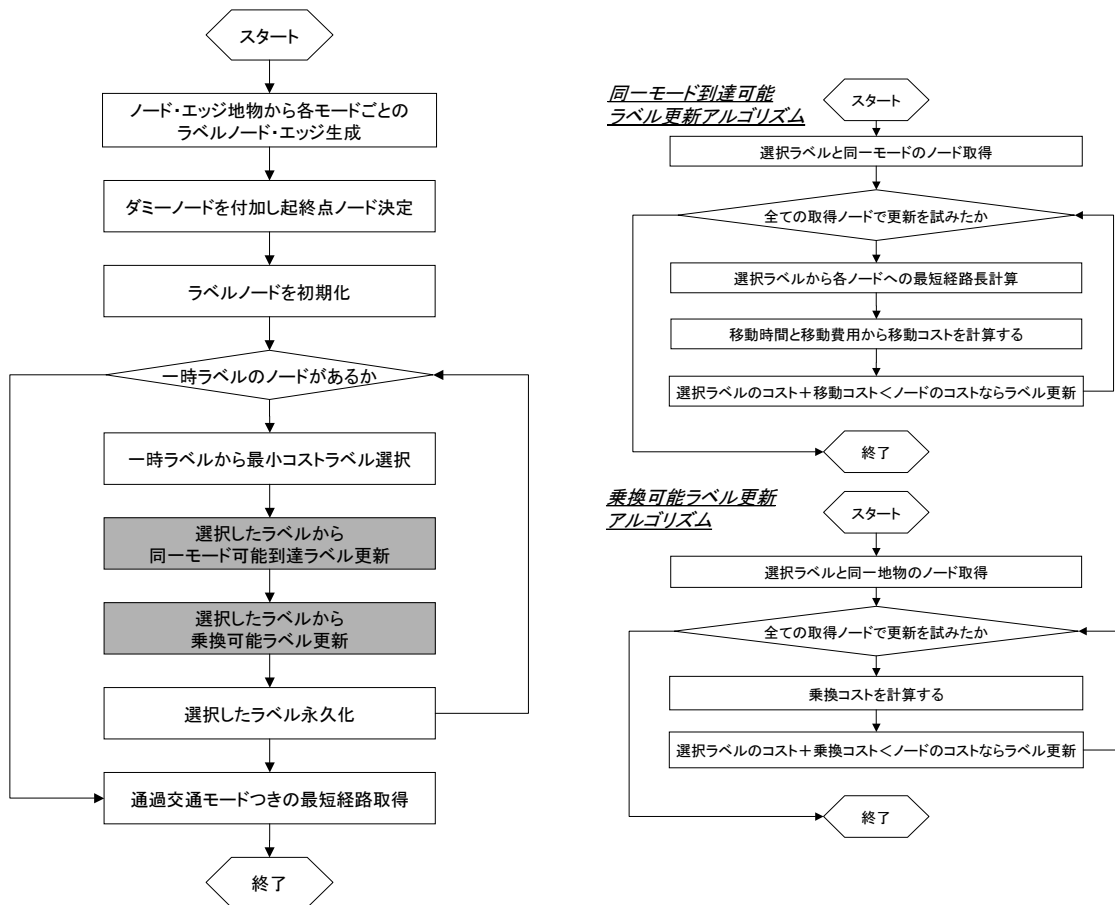


図 C.2: マルチモーダルな最短経路探索アルゴリズム

最後に上記のアルゴリズムを可能にするために各ノード地物、エッジ地物が持つべきデータ例を示した。ノード地物は ID と座標と通過交通モード（複数可）であり、エッジ地物は自身の ID と接続ノードの ID（ここでは双方向としたので 4 つの ID を記録している）と通過交通モード（複数可）である（長さは算出

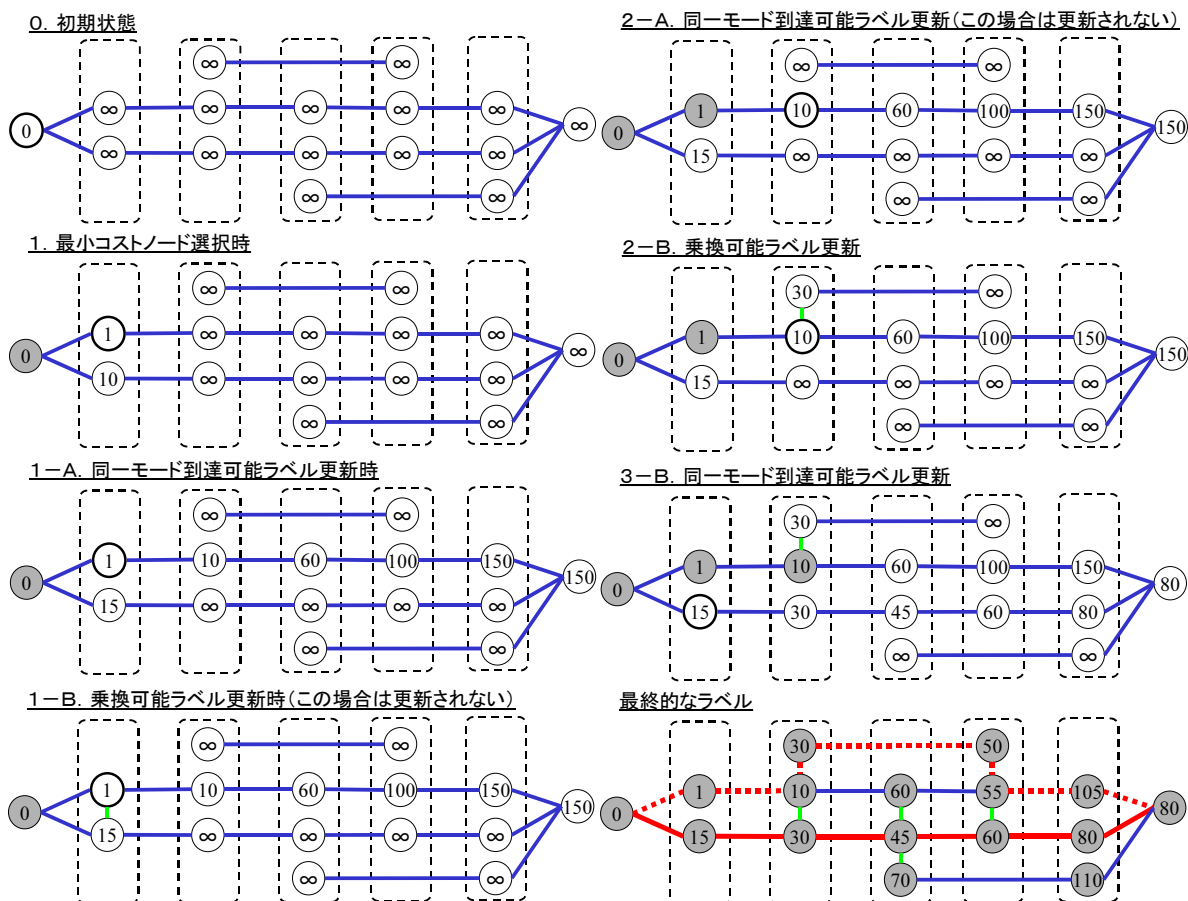


図 C.3: 提案アルゴリズムのラベルの更新状況

可能なので持つ必要は必ずしもない)。

ノード地物データ例

```

####左端の index は 0 からの通し番号である必要はなし
####x, y, z は double
####mode の数は複数可能 (とりあえずデフォルト移動モードは 3 (通常歩行) のみ)
####左から index, x, y, z, mode1, mode2, ....
1, 2, 18, 0, 3
2, 6, 18, 0, 3
3, 10, 18, 0, 3
4, 14, 18, 0, 3
5, 18, 18, 0, 3
6, 22, 18, 0, 3
7, 26, 18, 0, 3
8, 30, 18, 0, 3
9, 34, 18, 0, 3
10, 38, 18, 0, 3

```

エッジ地物データ例

```
###左端の index は通し番号の必要はない。  
###リンクが片方の向きしかない場合は番号の変わりに null と入れる  
###mode の数は複数可能（とりあえずデフォルト移動モードは 3（通常歩行）のみ）  
###左から index, length, startIndex1, endIndex1, startIndex2, endIndex2, mode1, mode2, ...  
1, 4, 1, 2, 2, 1, 3  
2, 4, 2, 3, 3, 2, 3  
3, 4, 3, 4, 4, 3, 3  
4, 4, 4, 5, 5, 4, 3  
5, 4, 5, 6, 6, 5, 3  
6, 4, 6, 7, 7, 6, 3  
7, 4, 7, 8, 8, 7, 3  
8, 4, 8, 9, 9, 8, 3  
9, 4, 9, 10, 10, 9, 3  
10, 4, 10, 11, 11, 10, 3
```

C.3 比較実験

ここでは以上のアルゴリズムに基づきマルチモーダルなネットワーク上のある OD で最短経路を求めるのにかかる計算時間をはかり、ノード数・リンク数との関係を調べた。この手の問題は規模が増えると急激に計算時間が増えるのでこのような比較検討を行っておき少しでも改善することは重要であり格子状ネットワークで試した（表 C.1）。また後から頻繁に与えた OD についての最短経路が参照される可能性がある時は、ネットワーク上の全 OD の組み合わせにおける最短経路を一度計算し、結果を保持しておくとなることが多い。

表 C.1: 格子状のネットワークにおける計算時間の比較

メッシュ数	ノード数	リンク数	ある OD での計算時間
10x10	121	440	2s
15x15	256	960	13s
20x20	441	1680	38s

付録 D

「人を測る」プロジェクトにおける人の時空間位置再構成の試み

本節では、いよいよ今まで様々な検討をしてきた展示会場フロアにおけるシミュレーション実験に対して実際の実験を行う。

D.1 実験概要

実験の諸元は表 D.1 に示した通りであり、かなりの数の出展ブースと来場者数であった（図 D.1）。また、図 D.2 が示すように約 150m 四方の L 字型の空間であり、入口と出口は管理の都合上、基本的に一箇所ずつに限定している。内部は通路とブースの面積比率は一对一程度のようなだった。

表 D.1: 実験諸元

日時	2001 年 6 月 21 日 10:00-13:00
場所	東京ビッグサイト西展示棟 4F
イベント名	全国測量技術大会 2001
出展ブース数	92
入場者数	約 5000 人（上記の時間帯のみ）
観測部隊	27 人

D.2 観測データ

観測の種類は、表 D.3 にまとめた。まず、トラフィックカウンタは 10 箇所に配置し、左から右に移動する人数、右から左に移動する人数を連続観測し 5 分ごとに集計した（図 D.8）。また巡回カメラ観測は、ブースを何箇所か選択し、それらを 5 分ごとに回り写真を撮り同時にその瞬間のブース滞在人数を目視で数えた（図 D.11）。また地上からのカメラ観測は熱赤外カメラとデジタルビデオで同時に取り、あるエリアの滞在人数の連続的な時間変化を求めようとした（図 D.9）。これは、一般のカメラやビデオが色情報を取っているのに比べ、熱赤外カメラは温度をとっているために、周囲の人工物との温度差、あるいは服の部分に比べ顔の温度が高いという意味で人間の抽出が容易な可能性があり、そのための熱赤外カメラの利用



図 D.1: 会場風景

可能性を探るという目的もあった（結果については [MN01] を参照のこと）。またトラッキング記録に関しては貴重な非集計データ計測であり，ここでは PEAMON を用いることとし，会場入口で被験者をつのった（図 D.7）。参加してもらえた 30 人程度の被験者には PEAMON をポケット等に入れてもらい，真値を紙に記録してもらうことにしたものの，あまりきちんと書いてもらえることはなかった。

また，一般の人に対し入口で他のパンフレットと一緒にアンケートを配布した。主にどのブースが印象に残ったかと会場内部にいた時間を知るのが目的であったがこれは完全に任意だったものの回収活動に励んだためかなり集まった（図 D.12）。また各ブースをまわり，担当者の方に実験時間中にどれくらいの人がブースに来たか，またイベント等を行ったかどうかとその時刻について聞いた。人数に関するデータは，推定の際の人数制約として使うことも可能であるし，重力モデルのような形で立ち寄り確率に関する仮説を立てるのにも有効である。また決まった時刻にベンダーフォーラムが会議室で行われていたのでその参加者人数も計測し，周辺の人数分布変化の推定にも役立てることを試みた。また最後に会場の出口のエリアで，レーザーを 2 台地上に据え置き，回転させながら周囲の人間の足に当て，レンジデータを取得することにより，人々の位置データを得た（このレーザーのレベルは安全である）（図 D.10）。これもレーザーの計測精度を見るのが主目的であり，この結果については [NI01] を参照して頂きたい（結果画像は図 D.5）。

それぞれの観測配置図を図 D.4 に示し，計測状況と問題点を表 D.6 にまとめ，主なデータは付録に記載した。

また熱赤外画像やレーザー画像に関してはまだ様々な面から検討が必要であり，本研究ではそれらの結果を直接使っていない。しかしこのような試みは今後新しい計測を喚起する場としても大きな可能性を持つであろう。

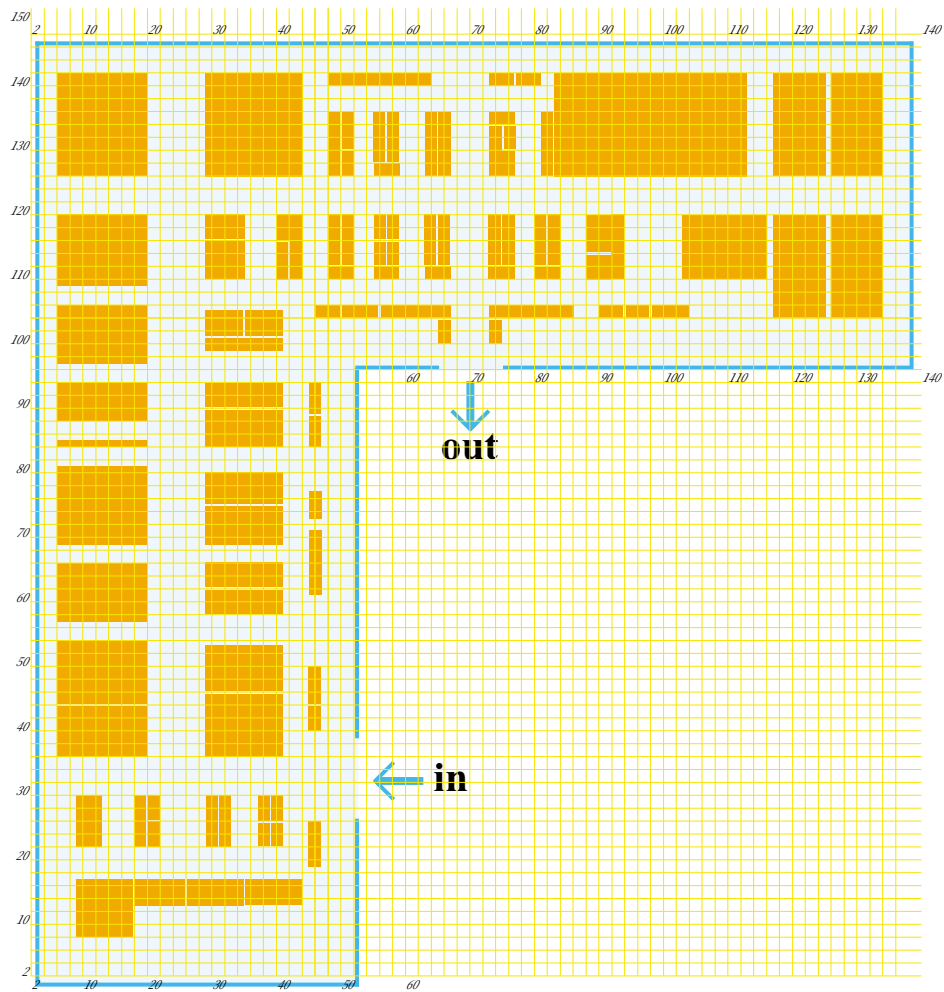


図 D.2: 展示会場見取り図

図 D.3: 各観測概要

観測名	観測属性	観測方法	観測周期	観測者
1. トラフィックカウンタ	通過有無, 上り下り	10 箇所の通路において, カウンタでデータを取り記録用紙に書き込む。	連続観測し, 5 分に一回集計	10人+2 人(交代要員)
2. 巡回カメラ観測	撮影時のカメラ対象領域の人数	ブースを回り, 写真を撮り人数をカウントする。	該当ブース 30 分～90 分に1枚程度	2 人
3. 地上からのカメラ観測	時間ごとのブースや通路の人数	熱赤外カメラとDVカメラである範囲を撮る。	基本的には3時間連続	1 人
4. トラッキング記録	ある人の連続的な時空間的位置とその人の年齢, 性別, 職業	記録用紙に自己申告したものとPEAMON ¹⁾ により自動的に記録	随時	授業で来場の学生と任意の被験者(合計30人程度)
5. 一般来客へのアンケート	年齢, 性別, 職業, 入退室時刻, 興味深かったブース	入場時に配布し, 退場時に書き込んでもらい回収	1 度のみ	事務局に配布委託, 回収は東大側で行う 配布数 1200
6. ブース担当者へのアンケート	1 日平均の来場人数	ブース担当者の自己申告	1 度のみ	事務局へ配布委託, 回収は東大側で行う (6 人)
7. ベンダーフォーラム参加者調査	ベンダーフォーラム参加者数	目視調査	開始時, 中間時, 終了時	1 人
8. レーザーを使用した出口の人数調査	出口の人数	出口を挟む 2 箇所からレーザーを足元に当てる。	30 分程度連続	2 人

1) PEAMON(Personal Activity MONiter)

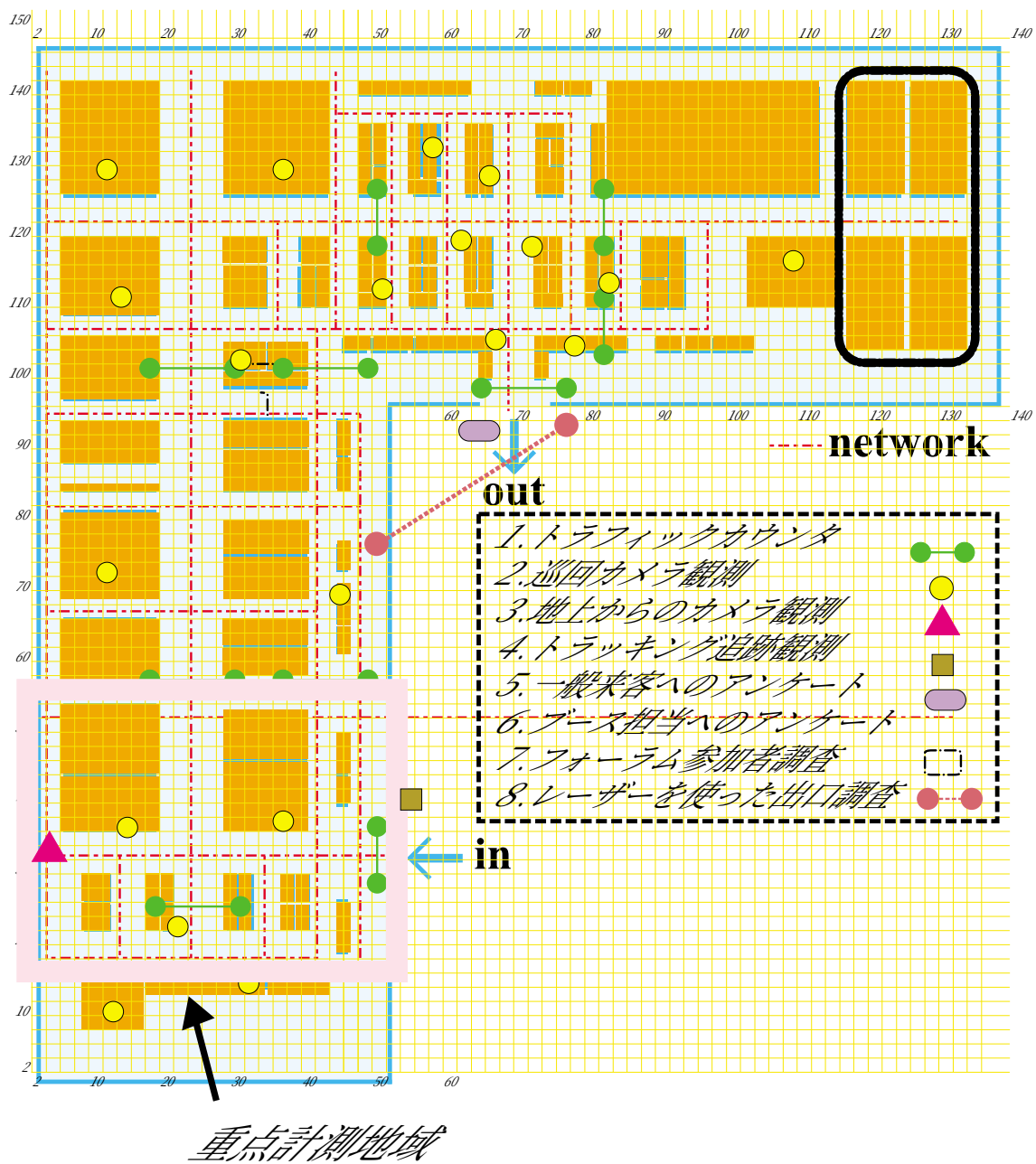


図 D.4: 観測配置図

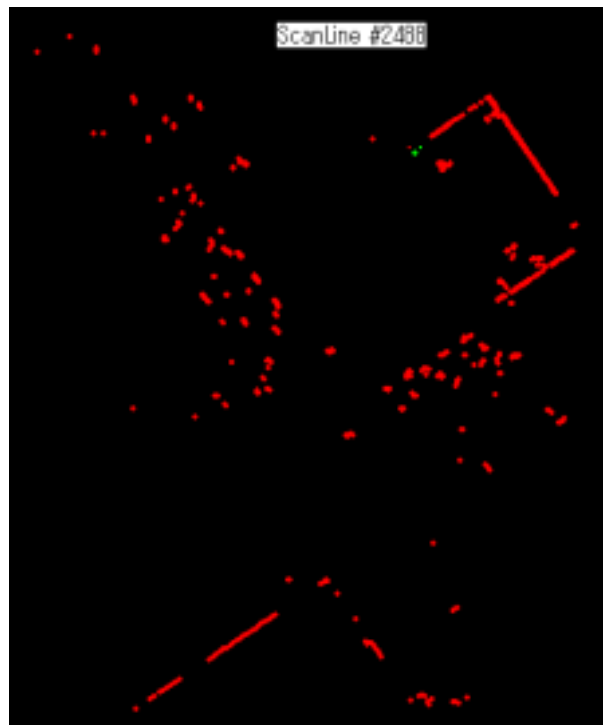


図 D.5: レーザー計測結果（柴崎研究室石原氏より）

図 D.6: 観測結果と問題点

観測名	達成度	問題点
1. トラフィックカウンタ	基本的には予定通り。予想より人が多くて計測がハードだった。	計測体制を再検討する。
2. 巡回カメラ観測	予定通り。	ブース内に様々なものがあるため、全体の人数を数えにくかった。
3. 地上からのカメラ観測	予定通り。	カメラの前でイベントがあったため、人だかりにさえぎられ、見通せなかった。
4. トラッキング記録	30 人程度が実験に協力。	PEAMONは取れたものの手書きの位置記録はほとんどの被験者には重荷だった。
5. 一般来客へのアンケート	1200 程度入口で配布して 170 程度出口で回収。	非常によく集まった。
6. ブース担当者へのアンケート	95 社中 90 社から回収。	よく答えて頂けた。
7. ベンダーフォーラム参加者調査	予定通り。	問題なし。
8. レーザーを使用した出口の人数調査	予定通り。	問題なし。



図 D.7: 会場入口での PEAMON 被験者募集



図 D.8: トラフィックカウンター計測



図 D.9: 熱赤外による計測



図 D.10: レーザーによる計測

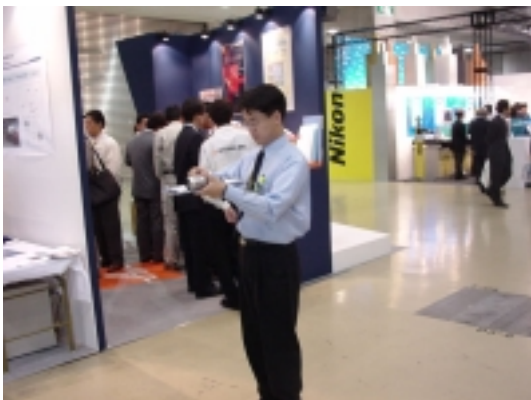


図 D.11: 巡回カメラ

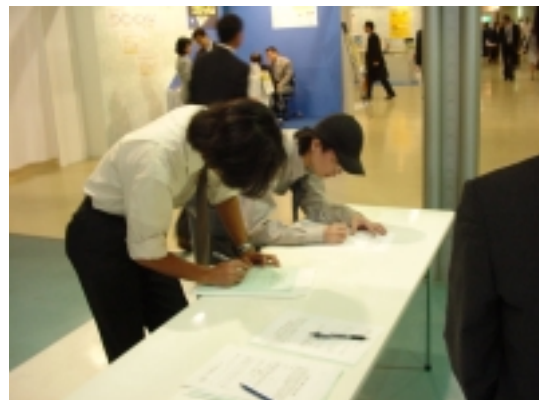


図 D.12: アンケート

D.3 一人の時空間位置の再現

ここでは PEAMON をベースにした被験者の時空間位置の再現を行った。会場がかなり広がったために重点計測地域を入口周辺の 60m 四方のエリアに設け、その各ブースにアンテナを配置した。解析の詳細は付録 E を参照とし、図 D.13 に結果を示す。残念なことに前述のように真値を正しく記入してくれた方がほとんどいなかったために、ここでは一人の分の結果しか載せることができなかった。次回実験を行う際には真値を正しく取れる方法を考えたい。

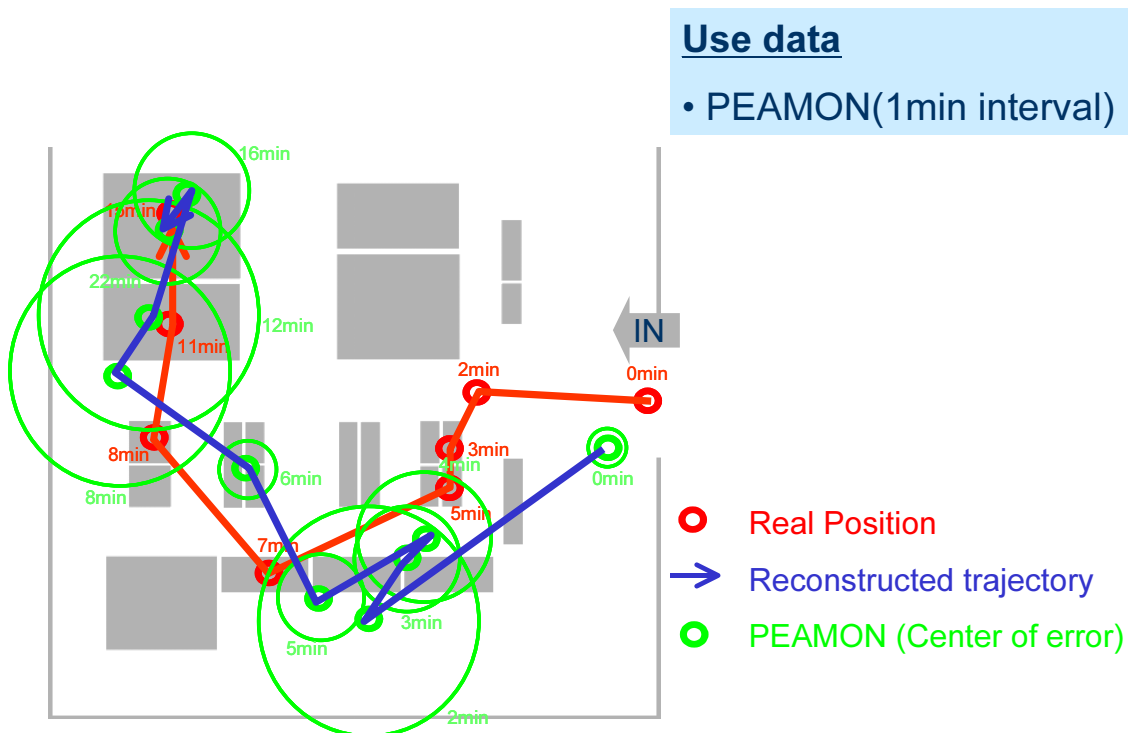


図 D.13: PEAMON による位置特定結果

図 D.13 のように特定結果の位置精度はそれほど高くない。従って PEAMON の観測誤差はとりあえず半径 10m 以内で等生起確率とし、今までのノウハウを活かし、表 D.2 のような実験条件で再現精度を比較した。まず実験 1 は当然、等生起確率であれば、観測値周りで適当にちらばってしまい、精度は上がらずむしろ悪い。そこで、起点についての知識や分速の上限を与えた所、多少精度が向上した。さらに観測誤差が半径 10m から 6m に変え、さらに解の存在範囲を 1m メッシュの座標から、4m メッシュに変更した所、かなり近い軌跡が得られた。しかしこれらのパラメータの変化は現状では試行錯誤的であり、今後自動化が重要と思われる。

表 D.2: PEAMON と様々な知識を組み合わせた再構成の精度比較

観測データ	使用知識	精度
PEAMON (誤差範囲 10m)	なし	15m
PEAMON (誤差範囲 10m)	OD 既知 移動距離制約 (分速 20m 以下)	12m
PEAMON (誤差範囲 6m)	OD 既知 移動距離制約 (分速 20m 以下) 存在範囲の制約 (1m から 4m メッシュに変更)	6.8m

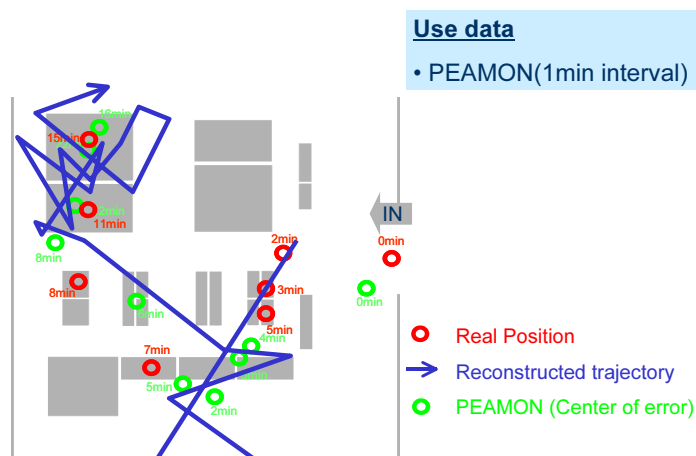


図 D.14: 実験 1

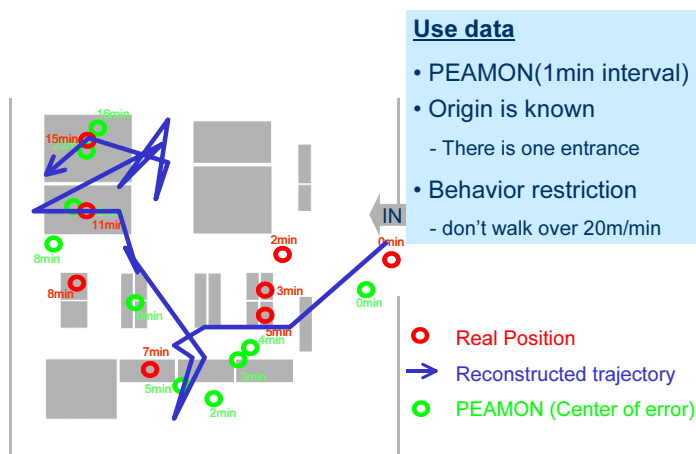


図 D.15: 実験 2

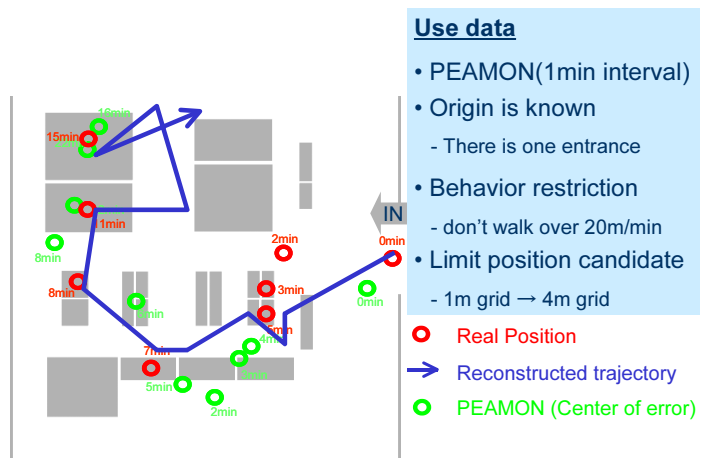


図 D.16: 実験 3

付録 E

PEAMON の解析

E.1 PEAMON とは

「人を測る」プロジェクトでは、一人の時空間位置を再構成する際に非集計データがある程度は必要であり、屋内であるために GPS は使えないことから PEAMON(PERsonal Activity MONitor) を用いた。PEAMON は PHS と記録媒体であるコンパクトフラッシュを持つオフライン型端末であり、アンテナ ID(CSID:Cell Station ID) と受信電界強度 (RSSI:Received Signal Strength Index) を最短で 15 秒ごとに記録でき、それらから本人の大体の位置が特定できるようになっている。図 E.1 から外観が、図 E.2 から内部の様子がわかる。



図 E.1: PEAMON の外観



図 E.2: PEAMON の内部 (<http://www.e-tsu.org/index2a-1c.html> より)

実際にはリアルタイム PEAMON(RT-PEAMON) と普通の PEAMON があり、前者は RSSI データと上位 7 つの CSID データがわかるものの高価であり、後者は上位 7 つの CSID データのみが記録でき安価である。ここでは事前に適当なアンテナの配置を検討する際に RT-PEAMON を用い、被験者用には普通の PEAMON を用いた。またアンテナには、出力を調整できるアッテネータ付きアンテナとすでに固定されて

いるアンテナを用いた。前者は高価であり，後者は安価である（図 E.3）。



図 E.3: パワーアンテナ

すでに PEAMON を使った実験はいくつか行われており，基本機能に関しては [岡本 00]，商業フロアのような狭域での位置特定に利用した研究もある [岡本 01]。

E.2 アンテナの配置と PEAMON のチェックポイント

今回の実験では，重点計測地域のみアンテナを配置し，PEAMON 実験の対象エリアとした（図 E.4）。合わせて 23 個のアンテナを配置し，事前に 41 箇所の観測ポイントでデータを記録しておき，各アンテナの電波の伝播具合を推定するのに用いた。被験者は 30 人程度を募ることができ，重点計測地域にいたのは約 10 分程度だった（表 E.1）。

表 E.1: PEAMON 実験の諸元

RT-PEAMON による観測地点数	41
ノーマルアンテナ数	13
アッテネータつきアンテナ数	10
被験者数	30 人程度
エリア内平均滞在時間	10 分程度

E.3 解析方法と結果

解析の概要は図 E.5 のようになっている。まず RT-PEAMON の RSSI データと CSID データから各アンテナの電界強度マップを作成し，そのマップ群と被験者データの各時間ごとの上位 7 つのアンテナ ID を照らし合わせることで，存在位置が特定できる。

電界強度マップ作成については，以下に示すような減衰曲線を仮定しパラメータを推定した。図 E.6 はあるアンテナのパラメータの推定である。その結果に基づき，内挿を行い，マップを作成する。

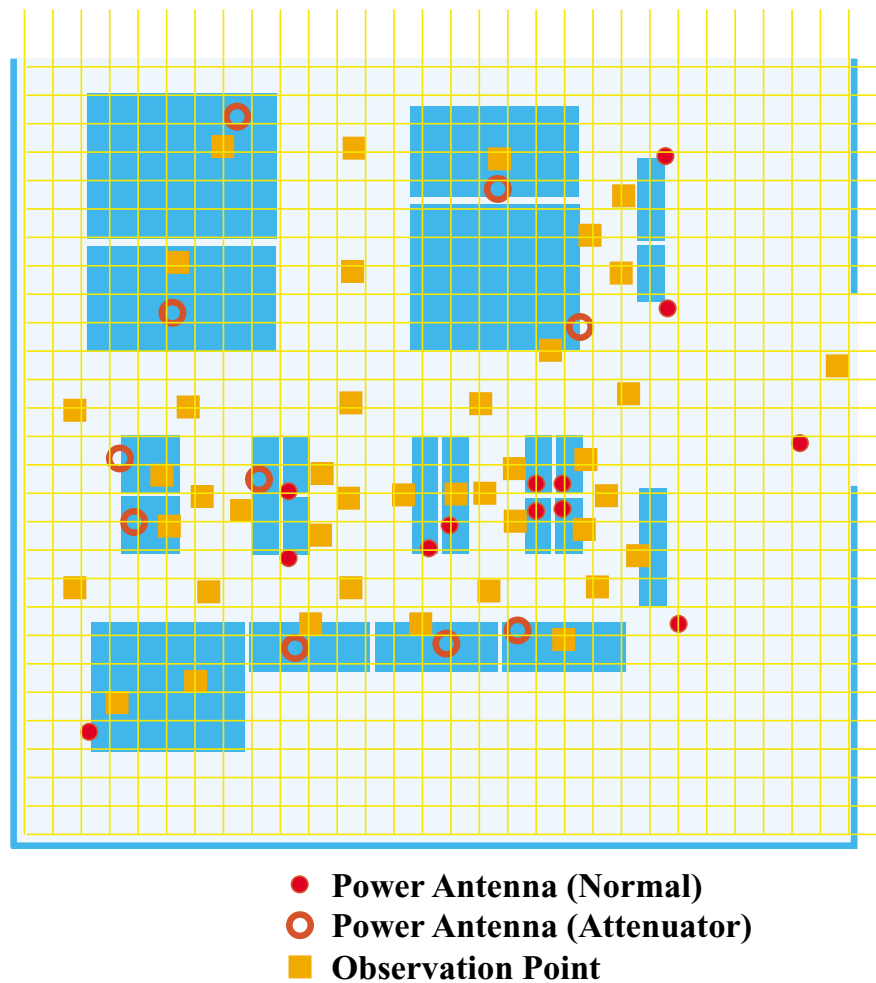


図 E.4: アンテナの配置とチェックポイント

$$RSSI = ax^{-b} \quad (E.1)$$

$RSSI$: 電界強度, x : 観測地点とアンテナの距離, a : アンテナ出力強度, b : アンテナ減衰パラメータ

マップ群と上位 CSID の参照に関しては、以下のルールで行った。

1. 各時間ごとに電界強度が 1 位となるアンテナのカバーエリアを存在エリアとする。
2. 2 位以下でさらに存在位置を限定できる時は限定する。

たとえば、図 E.7 では、あるグリッドで電界強度の順番は A5,A4,A1 となっており、PEAMON データと一致しているのでそのグリッドは存在エリアの一つである。そして最後に存在エリアの重心を求めた。ある PEAMON データではそれらを 15 秒ごとにつないでいった軌跡は以下ようになった。大雑把な位置把握は出来そうであるものの一つ一つはかなり誤差があるため、次節で精度向上の検討を行った。

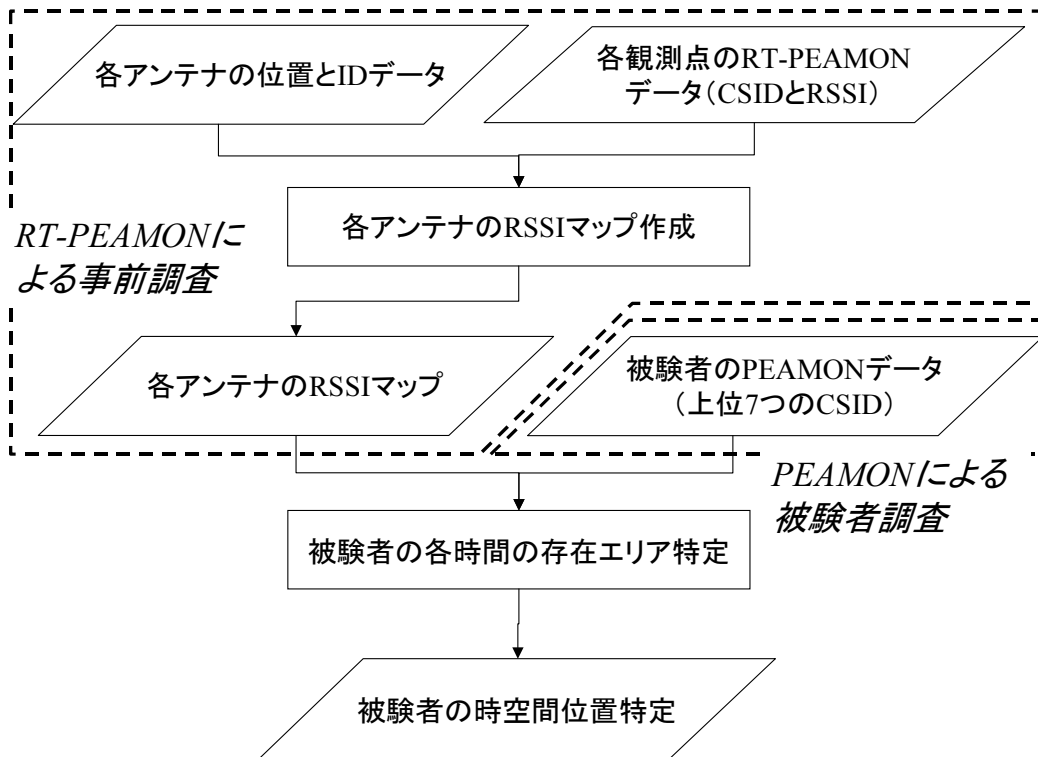


図 E.5: 解析の概要フロー

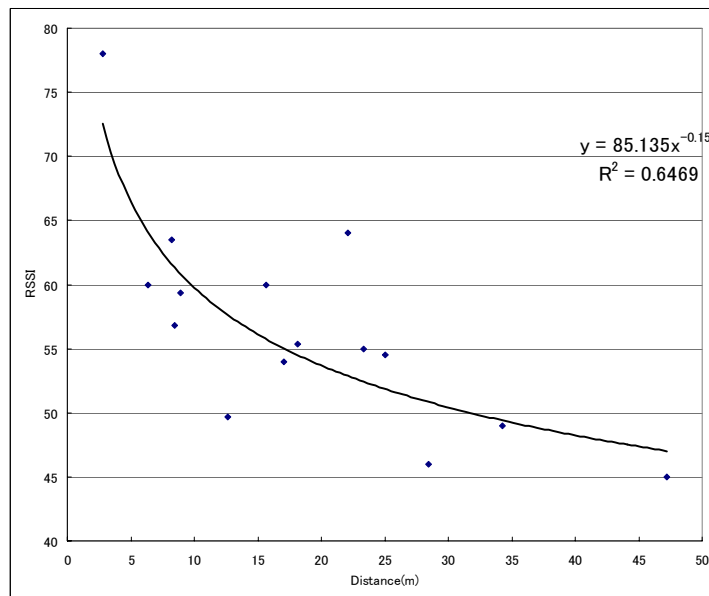


図 E.6: あるアンテナの減衰パラメータの推定

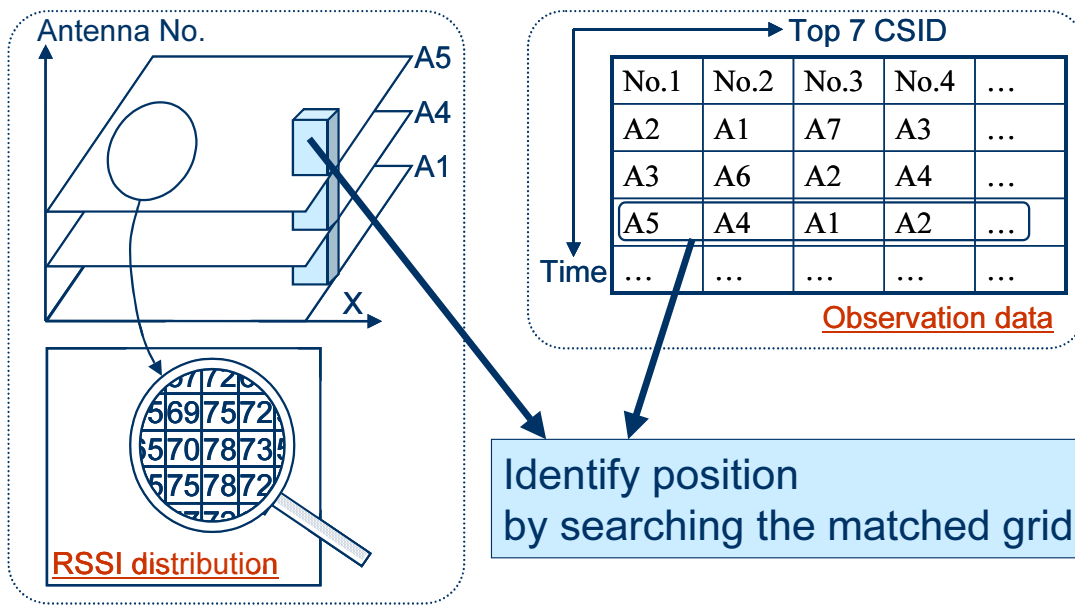


図 E.7: 上位受信アンテナの影響範囲の重ね合わせ

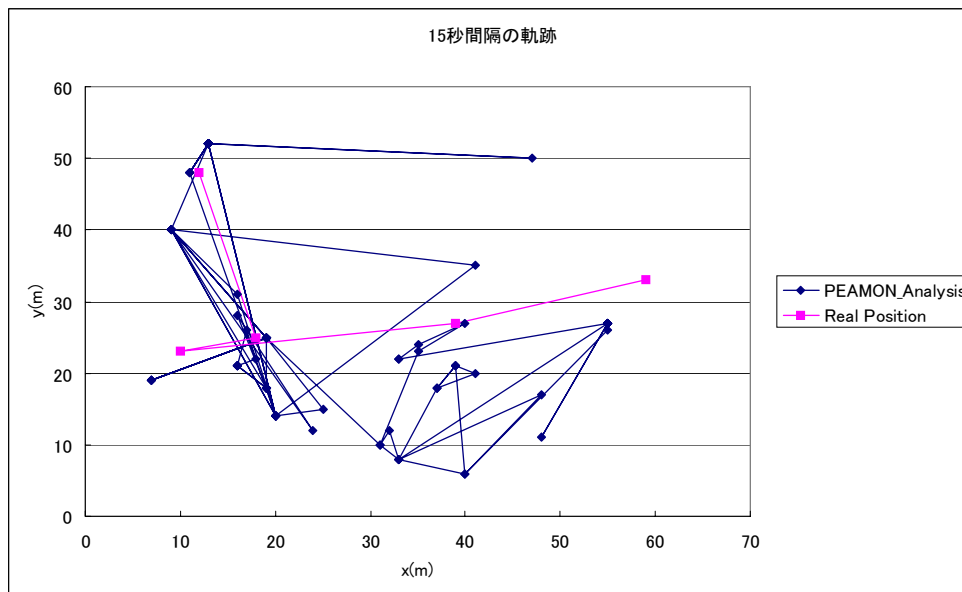


図 E.8: ある人の軌跡

E.4 精度向上の工夫

ここではある特定の人の PEAMON データを用いて以下の点で工夫を行った。

1. アンテナデータの利用法
2. 時間の間引き
3. 時間の平滑化

アンテナデータの利用法

アンテナデータの利用法として、全てのアンテナを利用する場合、上位 7 つを利用する場合、相対的な順位は厳密には守る必要がなく、各順位で守るべき RSSI 値最低ラインを設けそれを満たしているかどうかのみチェックする場合の 3 つを試した。全てのアンテナデータを利用する際、それ以外のアンテナは必ず上位 7 つより RSSI 値が下にならねばならない。逆に上位 7 つのみを利用する時はそれ以外のアンテナの RSSI 値は気にしない。さらに最後では厳密に順位を守る必要もない。後になるにつれ制約がゆるくなり、有効な解が出てくることが期待されたが結果はそれほど差がなかった。従って以下では全てのアンテナを利用した場合で行う（図 E.9）。

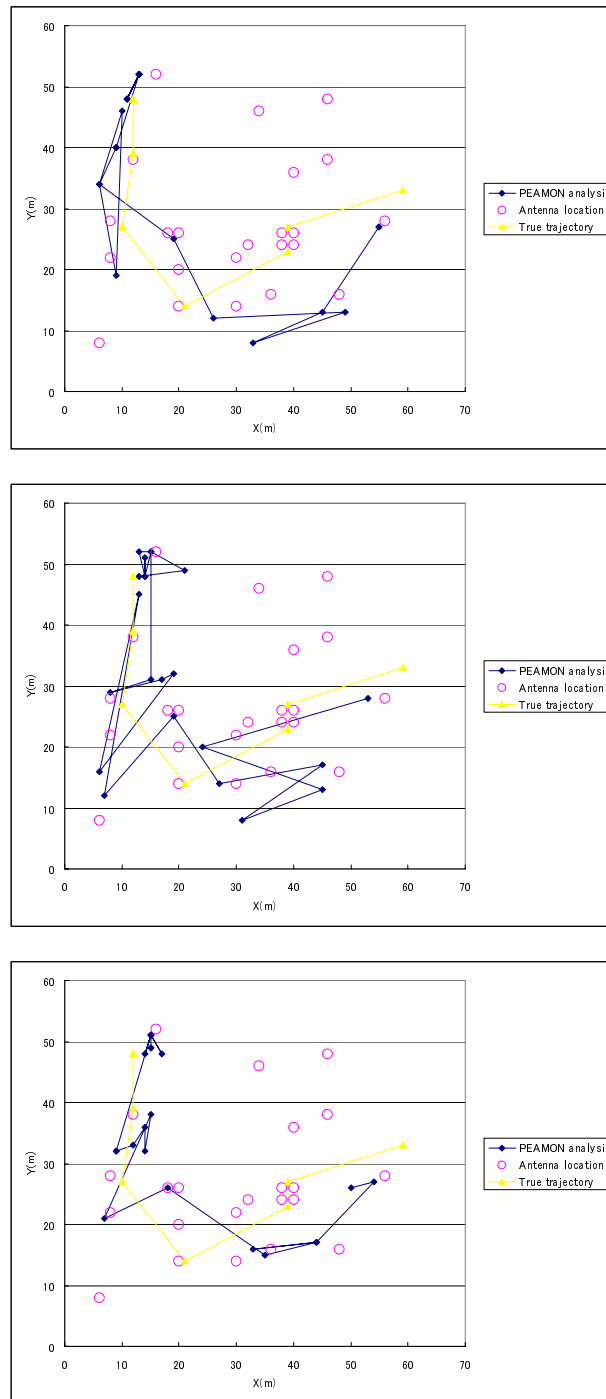


図 E.9: アンテナデータの使用法の比較（上段図：全ての順位使用，中段図：上位 7 つの順位のみ使用，下段図：厳密に順位を守る必要なし）

時間の間引き

15 秒ごとのデータを全て使うのは軌跡としてかなり不自然なものになってしまうために 1 分間隔に間引いた。これはかなり良い結果になったといえよう（図 E.10）。

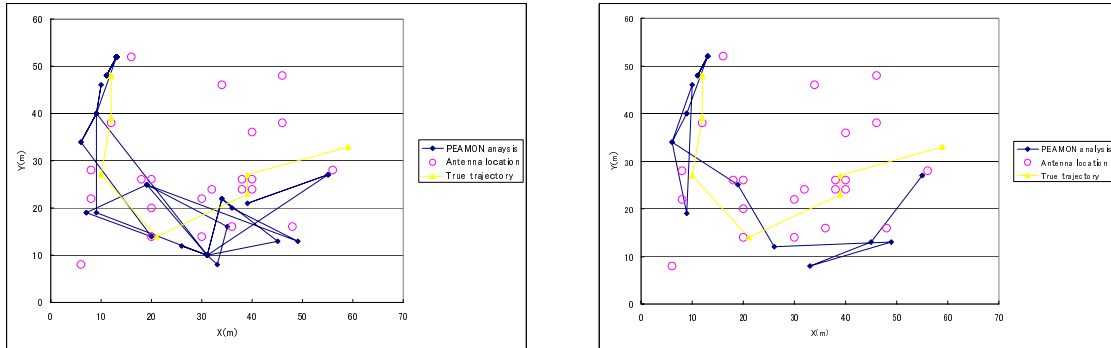


図 E.10: 時間間隔で間引いた場合の比較（左図：全てのデータ（15 秒間隔）を用いた場合，右図：1 分間隔に間引いた場合）

時間の平滑化

単純に間引くだけであると、情報を捨ててしまっているので前後の 15 秒あるいは 30 秒で平均化を行った。これも平滑化しないものよりもかなり良くなったといえよう（図 E.11）。

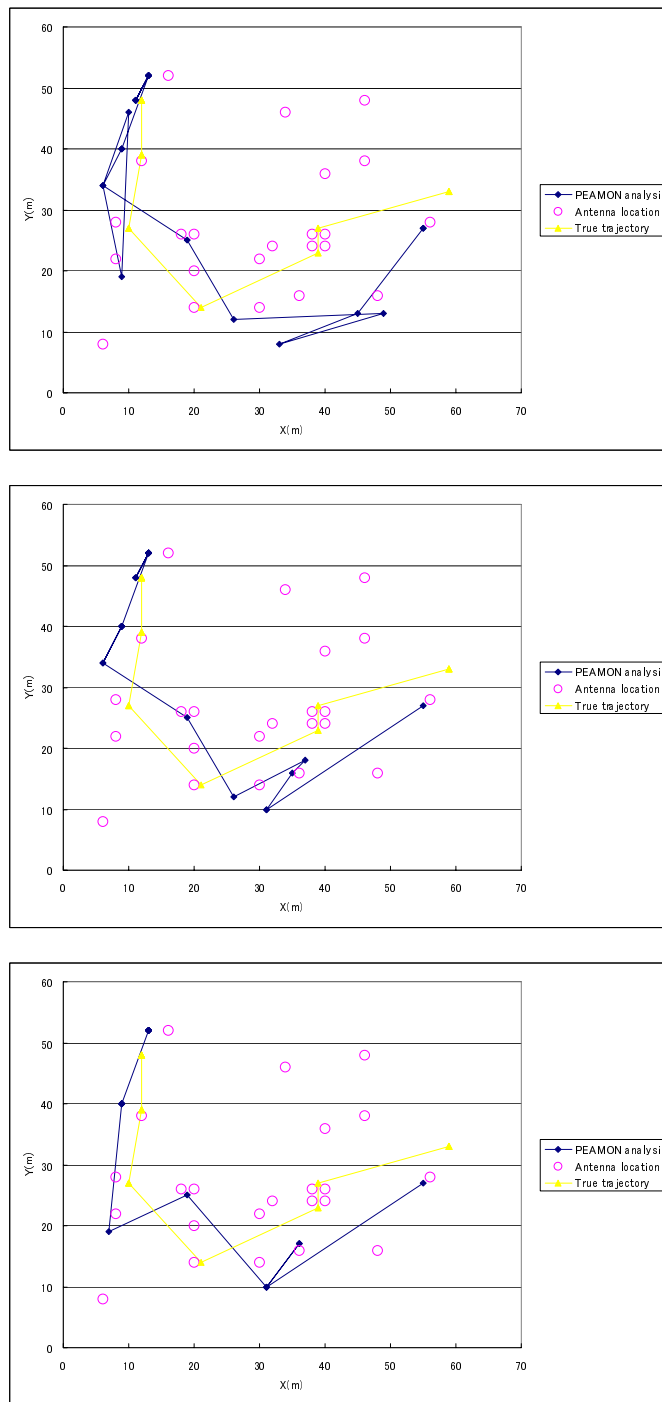


図 E.11: 時間の平滑化比較（上段図：平滑化せず，中段図：前後 15 秒で平滑化，下段図：前後 30 秒で平滑化）

付録 F

「人を測る」プロジェクトで得られたデータ

PEAMON データに関しては付録 E を参照。

F.1 一般アンケート

ID	年齢	性 別 (0: 男;1:女)	職種	入場時刻	退場時刻	印象に残ったブース 1	2	3	4	5
1	41	0	9	10:30	15:15	11	17			
2	19	0	6	10:30	11:50	100	18			
3	19	0	6	10:30	11:30	100				
4	20	0	6	10:30	11:50	34				
5	20	0	6	10:30	11:50	100	18			
6	20	0	6	11:30	11:40	13				
7	20	0	6	12:00	12:05	10				
8	20	0	6	10:20	11:20	44				
9	20	0	6	10:30		100	40	4		
10	20	0	6	10:20	11:15	100	101			
11	20	0	6	11:30	11:40	17				
12	20	0	1	10:30	11:30	18				
13	21	0	1	10:00	12:00					
14	21	0	1	10:30	12:00	18				
15	21	0	1	10:30	11:30	17	13			
16	21	0	6	11:30	11:40	17				
17	21	0	1	10:30	12:00	17	18	28		
18	22	0	1	10:30	12:00	17	16	32		
19	22	0	1	10:30	12:00	17	32			
20	22	0	1	10:00	11:30	17				
21	22	0	6	11:30	12:30	13	34			
22	22	0	1	10:30	11:15	17				
23	23	0	1	10:30	11:50	19				
24	23	0	1	10:00		17				
25	23	0	1	10:00	11:10	16	18			
26	23	0	3	10:00	11:30	89				
27	23	0	1			12				
28	23	0	1	10:00	11:20	17				
29	23	0	1	10:00	11:35	16				
30	23	0	1	10:00	11:00	17				

ID	年齢	性 別 (0:男;1:女)	職種	入場時刻	退場時刻	印象に残ったブース 1	2	3	4	5
31	24	0	3							
32	24	0	1	10:30	3:30					
33	24	0	1	10:30	17:30	18	T 社			
34	24	0	1	10:00		12				
35	24	0	1	10:30	11:30	18				
36	25	0	1	10:00	12:05					
37	25	0	1	10:00	12:10					
38	25	0	1	11:00	12:15					
39	26	0	1	10:30						
40	26	0	9	10:00	10:40	29	87	27	80	
41	26	0	1	10:00		12				
42	26	0	1	10:30	16:30					
43	26	0	1	10:00	12:00	9	12			
44	26	0	1	11:00						
45	26	0	1	10:30	11:30					
46	26	0	1	10:50	11:30	18				
47	26	0	3	10:00	11:45	18	P 社			
48	26	0	9	10:10	12:00	28				
49	26	0	1	10:00	12:00	13	15			
50	26	0	1	10:00	11:30	18				
51	27	0	1	10:00	11:30	16				
52	27	0	1	10:00		87				
53	27	0	1	10:30	11:40	27				
54	27	0	1	10:30	11:20	27	29			
55	27	0	1	10:00	11:23	13	18	2		
56	27	0	1	10:00	15:30	13	26			
57	27	0	1	10:30		19				
58	27	0	1	10:30	12:10	18	11	12		
59	27	0	1	10:00	12:00	18	12			
60	27	0	1	10:00	11:10	12				
61	27	0	1	10:00	11:00	15				
62	27	0	1	10:00	11:00	13				
63	28	0	1	10:00	12:26	15	18	13	12	17
64	28	0	1	11:00	15:00	18				
65	28	0	1	10:00	12:00					
66	28	0	1	10:30	16:00					
67	28	0	1	10:00	12:00					
68	28	0	1	10:00	12:05	17				
69	28	0	1		12:00	17				
70	28	0	1	10:00	12:10	12				
71	28	0	5	10:00	11:00	16	89			
72	28	0	2	10:00	11:00	13				
73	28	0	2	10:00	10:50	17	15	34		
74	29	0	1	10:00	12:00	12	9	80		
75	29	0	3	11:00	12:15	10				
76	29	0	1	11:30	12:20	12				
77	29	0	1	9:30	10:40					
78	29	0	1	10:00	10:35					
79	29	0	1	10:00	12:00	13	26			
80	29	0	1	10:00	10:30	11				
81	29	0	1	10:00	11:30	34				
82	29	0	3	10:30	12:00	27				
83	29	0	1	10:30	11:30	34	67			

ID	年齢	性 別 (0: 男;1:女)	職種	入場時 刻	退場時 刻	印象に残っ たブース 1	2	3	4	5
84	30	0	1	10:00	12:00	33				
85	30	0	1	11:00	12:00	17				
86	30	0	1	11:30	12:20	26				
87	30	0	9	10:15	12:10					
88	30	0	1	10:30	11:30	34				
89	30	0	1	10:30	11:30					
90	31	0	1	10:05	11:30	18				
91	32	0	9	9:30	12:30	34				
92	32	0	1	10:00	11:10	16				
93	32	0	1	10:00		4				
94	32	0	1	11:00	12:05					
95	32	0	1	10:00	10:30	19	2	I 社		
96	33	0		10:20		19				
97	33	0	1	10:30	16:30					
98	33	0	1	10:00	12:00	17	10	11		
99	33	0	1	10:00	12:00	11				
100	33	0	1	11:00	11:30					
101	33	0	1	10:00	14:00	17	15			
102	34	0	2	11:00	12:15	11				
103	34	0	1		12:00	17	11			
104	34	0	1	11:30	12:20					
105	34	0	1	10:00	11:30					
106	35	0	9	10:30		15	29	24		
107	35	0	1	9:20	9:50	18				
108	35	0	1	10:30	12:45	17	16	18		
109	35	0	9	10:30	12:00	54				
110	35	0	1	10:30	12:00	17				
111	35	0	1	10:30	11:00	17	18			
112	36	0	1	10:00	12:05	17	12			
113	36	0	1	10:15	11:15	12				
114	37	0	1	10:00	17:00					
115	37	0	5	10:40	12:15					
116	37	0	1	11:00	12:00	46				
117	37	0	1	10:00	11:20					
118	38	0		10:15	12:10	15				
119	38	0	4	10:30	12:30	18	15			
120	38	0	1	10:30	11:30					
121	38	0	1	9:30	14:00	13	11	17		
122	39	0	1	10:00	11:00					
123	39	0	1	10:00	11:00					
124	39	0	1	11:00		18	9			
125	39	0	2	10:00	12:00	15	17			
126	40	0	1	10:05	11:45	16	84			
127	40	0	5	10:00	12:00	10				
128	41	0	1	11:00		9				
129	42	0	1	10:00	11:15					
130	42	0	1	10:00	11:00					
131	43	0	4	10:00	11:00	19				
132	43	0	1	10:30	12:00	15	57			
133	44	0	1	10:00	17:00					
134	45	0	1	10:00	12:00					
135	45	0	1		11:50	16				
136	45	0	2	11:40						

ID	年齢	性 別 (0:男;1:女)	職種	入場時刻	退場時刻	印象に残ったブース 1	2	3	4	5
137	46	0	5	10:00	11:30	33				
138	47	0	1	11:00	12:00					
139	47	0	1	10:00	12:00	25				
140	47	0	1	10:00		50				
141	47	0	2	10:30	12:30	17	18			
142	48	0	1	10:00	11:30					
143	48	0	4	10:00	15:00	11	13			
144	48	0	5	10:30		29	43			
145	50	0	1	11:00	12:00	46	S 社	M 社		
146	50	0	1	10:10	12:10	17				
147	50	0	9	10:10	10:35	28				
148	50	0		10:00	10:40	80				
149	51	0	4	10:30		12				
150	52	0	1	10:40	11:40	10	71			
151	52	0	1	10:00	17:00	15	17			
152	52	0	3	10:40	12:35	18				
153	56	0	5	11:00	11:58					
154	57	0	3	10:30	10:50					
155	57	0		10:40	11:40	18				
156	58	0	1	11:00	12:00	17	62			
157	60	0	4	10:30		17	13	100		
158	62	0		10:00	11:00	13	29			
159	65	0	4	11:01	12:26	36				
160	66	0	3	10:30		16				
161	70	0	1	10:20	12:00					
162	40	0	1	10:30	14:20	76	S 社			
163	40	0	1	10:00	11:30	33				
164	30	0	1	12:00	17:00	17	18	12	26	4
165	56	0	1	10:40	12:40	71				
166	65	0	8	10:55	11:45	17				
167	50	0	2	10:30		9				
168	78	0	2	10:15	11:45	18	H 社			
169	61	0	2	10:00	11:00	32				
170	32	0	3	10:00	11:00	32				
171	37	1	2	10:00	13:30					
172	20	1		10:00	11:20	17				
173	20	1	1	11:00	12:00	10				
174	21	1	1	11:00	11:40	19				
175	22	1	1	10:30	12:00	17				
176	22	1	2	10:00	11:00	17				
177	22	1	6	10:00	12:10	17	3			
178	23	1	2	10:10	10:50					
179	23	1	1	10:00		34				
180	25	1	1	11:00	12:00					
181	26	1	1	11:00	11:50					
182	27	1	3	10:00	11:00	16				
183	28	1	1	11:15	11:55	16	85			
184	29	1	1	10:00	10:40	17				
185	35	1	1	11:00	11:50	12				
186	40	1	1	11:00	11:43	69	26			
187	42	1	1	11:00	11:40	69	65	27		
188	50	1	4	11:00	11:50					
189	56	1	9	10:07	10:37	12				

F.2 企業ブースアンケート

ブース ID	来場者 数	イベン ト有無 (0:な し, 1: あり)	イベン ト来場 者数	イベン ト時刻 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	40	0											
2	140	0											
3	50	0											
4	50	1	12	10:30	11:15	12:00	12:45						
5	50	0											
6	28	0											
7	100	0											
8	30	0											
9	100	1	35	*									
10	400	0											
11	300	1	50	10:15	11:15								
12	314	1	40	10:15	10:45	11:15	11:45	12:15	12:45				
13	1000	1	30	10:15	10:45	11:15	11:45	12:15	12:45				
14	600	1	*	10:30	11:30								
15	250	1	10	10:30	11:15	12:00							
16	2000	1	20	10:00	11:15	12:15							
17	200	1	30	10:00	10:15	10:30	10:45	11:15	11:30	11:45	12:00	12:45	
18	1550	1	50	10:15	10:45	11:05	11:35	12:10	12:30				
19	49	1	24	10:00	10:15	10:30	10:45	11:00	11:15	11:30	11:45	12:00	12:15
20	400	0											
21	50	0											
22	*	0											
23	50	1	15	10:00	11:00	12:00							
24	*	0											
25	400	1	10	随時									
26	380	1	5	10:30	10:50	11:10	11:30	11:50	12:20	12:40			
28	200	1	40	10:30	11:15	12:15							
29	100	1	10	10:30	11:30	12:30							
30	70	1	15	11:30	11:45	12:30	12:45						
31	40	0											
32	275	0	3	随時									
33	350	1	20	10:20	11:00	11:40							
34	200	1	20	10:45	12:15								
35	50	0											
36	150	0											
37	100	0											
38	38	0											
39	123	0											
40	89	0											
41	50	0											
42	15	0											
44	300	0											
45	25	0	2	随時									
47	35	0											
48	40	0											
50	50	1	10	10:30	11:30	12:30							

[illegible]

F.3 トラフィックカウンタデータ

観測時刻	1LR	1RL	2LR	2RL	3LR	3RL	4LR	4RL	5LR	5RL
10:05	18	116	3	5	8	39	12	8	25	10
10	42	230	15	20	21	79	36	14	60	24
15	58	365	25	36	28	135	67	26	100	40
20	81	477	45	51	41	196	86	40	154	61
25	98	587	62	77	60	259	126	46	230	89
30	127	690	79	98	95	303	160	57	282	117
35	164	782	93	116	132	353	199	69	338	175
40	192	868	113	132	161	429	219	76	402	206
45	221	949	121	145	212	496	231	87	468	246
50	256	1067	124	154	228	563	259	105	548	288
55	295	1181	160	192	274	646	287	116	674	346
11:00	348	1290	166	197	319	727	327	147	763	410
5	387	1392	184	213	386	802	375	165	896	476
10	425	1465	201	228	421	879	417	190	974	523
15	463	1582	217	246	481	951	455	220	1054	604
20	512	1676	242	264	502	997	493	251	1121	661
25	565	1757	253	286	561	1060	508	270	1219	760
30	689	1829	278	304	641	1115	552	313	1332	852
35	704	1897	309	322	701	1164	596	347	1423	914
40	767	1983	322	338	754	1218	630	387	1484	990
45	846	2049	339	356	810	1287	657	414	1561	1075
50	911	2122	353	371	859	1334	684	438	1621	1143
55	1038	2179	377	387	946	1378	718	482	1704	1238
12:00	1164	2267	398	406	1036	1423	764	519	1772	1321
5	1268	2351	412	432	1095	1462	803	571	1845	1405
10	1400	2430	430	446	1153	1506	836	601	1916	1482
15	1443	2491	440	462	1223	1583	860	638	1979	1551
20	1511	2584	451	480	1263	1652	880	659	2060	1625
25	1584	2675	461	491	1308	1701	925	685	2124	1662
30	1668	2767	472	509	1358	1747	952	716	2180	1720
35	1749	2850	500	531	1404	1806	974	742	2272	1777
40	1821	2932	513	533	1461	1858	997	764	2332	1834
45	1904	3065	527	556	1501	1937	1027	793	2416	1891
50	1970	3188	530	562	1563	1999	1066	831	2501	1964
55	2047	3295	551	579	1613	2056	1123	866	2591	2041
13:00	2126	3394	561	588	1670	2133	1151	891	2690	2119

観測時刻	6LR	6RL	7LR	7RL	8LR	8RL	9LR	9RL	10LR	10RL
10:05	8	14	10	21	55	27	6	3	10	18
10	20	21	31	29	82	47	12	11	14	25
15	43	29	48	52	112	69	20	18	25	36
20	59	42	67	70	142	90	27	22	43	53
25	72	50	105	85	175	120	32	28	52	69
30	99	65	151	119	202	136	36	33	74	92
35	125	81	179	150	226	162	53	50	101	127
40	147	97	211	168	245	193	78	76	118	145
45	179	122	260	201	291	233	103	111	146	165
50	202	140	296	227	333	267	142	145	165	212
55	229	165	354	259	365	297	174	206	186	254
11:00	258	186	411	292	388	325	217	283	210	294
5	304	201	467	333	414	366	252	340	237	339
10	339	231	528	378	446	398	302	389	270	371
15	371	261	593	421	476	436	337	438	293	411
20	414	291	659	469	518	481	404	516	338	441
25	450	336	731	509	565	527	470	569	375	496
30	490	373	817	559	591	588	527	633	409	532
35	527	411	871	589	618	621	574	676	459	576
40	550	437	936	637	654	666	621	738	504	618
45	586	466	989	674	692	737	695	782	539	668
50	621	501	1051	742	716	818	803	865	605	690
55	654	526	1112	801	760	915	900	910	642	722
12:00	692	566	1156	852	804	1004	956	945	695	776
5	720	594	1220	888	838	1067	995	997	742	809
10	752	619	1284	927	867	1137	1045	1050	788	835
15	784	636	1335	967	887	1188	1086	1120	838	864
20	811	658	1396	998	927	1269	1137	1156	883	892
25	849	693	1450	1032	976	1341	1176	1189	931	920
30	876	715	1481	1073	1016	1386	1229	1235	966	953
35	907	739	1527	1091	1055	1441	1256	1275	998	989
40	927	760	1569	1123	1107	1492	1308	1323	1025	1041
45	944	793	1619	1160	1171	1556	1354	1363	1076	1090
50	982	837	1671	1195	1234	1617	1387	1414	1108	1124
55	1036	868	1728	1234	1315	1673	1433	1465	1150	1209
13:00	1064	888	1780	1269	1357	1709	1471	1535	1183	1246

F.4 巡回カメラ

観測時刻	ブース ID	ブース滞在人数	ブース前通路滞在人数
10:05	44	0	0
10	13	2	2
15	47	0	0
20	14	4	5
25	24	3	9
30	16	26	14
35	17	29	22
40	18	25	5
45	76	2	4
50	74	0	1
55	81	0	0
11:00	83	0	5
5	67	0	3
10	64	2	3
15	58	0	7
20	休憩コーナー	35	8
25	53 左	3	6
30	50	6	2
35	44	4	3
40	13	24	9
45	47	2	1
50	14	8	20
55	24	3	18
12:00	16	31	7
5	17	58	19
10	18	34	10
15	76	1	5
20	74	3	2
25	81	2	3
30	83	2	5
35	67	2	7
40	64	5	8
45	58	0	1
50	休憩コーナー	54	9
55	53 左	15	14
13:00	50	2	4

観測時刻	ブース ID	ブース滞在人数	ブース前通路滞在人数
10:05	3	5	3
10	休憩コーナー	2	1
15	5	0	0
20	10	18	4
25	34	15	6
30	40	1	5
35	3	1	1
40	休憩コーナー	9	0
45	5	3	1
50	10	25	6
55	34	5	5
11:00	40	1	4
5	3	3	4
10	休憩コーナー	10	3
15	5	1	2
20	10	28	12
25	34	5	6
30	40	2	5
35	3	8	2
40	休憩コーナー	18	3
45	5	0	4
50	10	32	16
55	34	5	5
12:00	40	1	7
5	3	2	5
10	休憩コーナー	21	0
15	5	3	0
20	10	14	8
25	34	8	5
30	40	2	6
35	3	3	8
40	休憩コーナー	11	2
45	5	5	0
50	10	23	4
55	34	3	6
13:00	40	1	3

研究発表

- 画像分類のための階層型ニューラルネットワークの設計法, 関本義秀・清水英範・Le, Van Trung, 日本写真測量学会年次学術講演会発表論文集, pp.155-158, 1997.
- Monitoring NDVI of North Korea using NOAA AVHRR data, Yoshihide Sekimoto, Ryosuke Shibasaki and Hiroaki Kondo, Proceedings of the 18th Asian Conference on Remote Sensing, 1997.
- A Study on a Framework of integration of Heterogeneous Spatio-Temporal Data, Yoshihide Sekimoto and Ryosuke Shibasaki, Proceedings of the 19th Asian Conference on Remote Sensing, Q-16, 1998.
- 時空間データの統合における概念的フレームワークとしての FEO (Feature/Event/Observation) モデルの提案, 関本義秀・柴崎亮介, 日本写真測量学会・日本リモートセンシング学会合同学術講演会論文集, pp.155-158, 1999. (日本写真測量学会 年次学術講演会論文賞 受賞)
- 時空間データの統合における概念的フレームワークとしての FEO モデルの提案, 関本義秀・柴崎亮介, 地理情報システム学会第 4 回オブジェクト指向 GIS ワークショップ予稿集, pp.1-4, 1999.
- Conceptual Data Modeling for Dynamic Revision of Spatial-Temporal Database, Yoshihide Sekimoto and Ryosuke Shibasaki, Proceedings of International Workshop Urban Multi-Media/3D Mapping, Tokyo, pp.195-202, 1999.
- 時空間データベースのダイナミックな更新を目指した概念データモデルの提案, 関本義秀・柴崎亮介, 地理情報システム学会講演論文集, pp.93-98, 1999.
- 時空間データベースのダイナミックな更新を目指したシステムの構築, 関本義秀・柴崎亮介, 写真測量学会平成 11 年度秋季学術講演会発表論文集, pp.85-88, 函館, 1999.
- 線分の位置誤差に関する評価指標の提案, 関本義秀・柴崎亮介・賀川義昭, 第 24 回土木情報システムシンポジウム講演集, pp.81-84, 1999.
- 時空間データベースのダイナミックな更新を目指した概念データモデルの提案, 関本義秀・柴崎亮介, 第 24 回土木情報システムシンポジウム講演集, pp.113-116, 1999.
- Conceptual Data Modeling for Dynamic Revision of Spatial-Temporal Database, Yoshihide Sekimoto and Ryosuke Shibasaki, Proceedings of the 20th Asian Conference on Remote Sensing Volume 2, pp.800-806, 1999.
- Comparative Study of Positional Accuracy Evaluation of Line Data, Yoshiaki Kagawa, Yoshihide Sekimoto and Ryosuke Shibasaki, Proceedings of the 20th Asian Conference on Remote Sensing Volume 2, pp.1087-1092, 1999.
- 関本義秀・柴崎亮介, 時空間データベースのダイナミックな更新を目指した概念データモデルの提案, GIS -理論と応用, Vol.8(1), pp.63-73, 2000.
- Yoshihide Sekimoto and Ryosuke Shibasaki, Dynamic Revision of Spatio-Temporal Database with Simulated Features, Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing

(ISPRS2000), Amsterdam, pp.917-924, 2000.

- Yoshihide Sekimoto and Ryosuke Shibasaki, Conceptual Data Modeling for Dynamic Revision of Spatial-Temporal Database, Proceedings of 9th International Symposium on Spatial Data Handling (SDH2000), Beijing, pp.7a.42-56, 2000.
- 関本義秀・柴崎亮介, 地物のテンプレートを用いた都市の再構成, 写真測量学会平成 12 年度秋季学術講演会発表論文集, pp.275-280, 2000.
- Hiroyuki Tanaka, Yoshihide Sekimoto, Ryosuke Shibasaki, Resonstruction of spatio-temporal distribution of event visitors by fusing multi-source data, Proceedings of 22nd Asian Conference on Remote Sensing”, pp.1119-1122, 2001

参考文献

- [All83] J. F. Allen. Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communication of the ACM*, Vol. 26, pp. 832–843, 1983.
- [Cam90] S. Cameron. Collision detection by four-dimensional intersection testing. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 3, pp. 291–302, 1990.
- [CEO98] CEOS Global Mapping Task Team. A strawman proposal for a standard sensor description format for earth observing dynamic sensors, 1998.
- [Cob97] Stewart Cobb. *GPS PSEUDOLITES: Theory, Design, and Applications*. PhD thesis, Stanford University, 1997.
- [Con91] et al. Console, L. Fuzzy temporal reasoning on causal models. *International Journal of Intelligent System*, Vol. 6, pp. 107–133, 1991.
- [CS00] W. Eric L. Grimson Chris Stauffer. Learning patterns of activity using real-time tracking. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 8, pp. 747–757, 2000.
- [DA01] Mubarak Shah Douglas Ayers. Monitoring human behavior from video taken in an office environment. *Image and Vision Computing*, Vol. 19, pp. 833–846, 2001.
- [EG98] M. Egenhofer and R Golledge, editors. *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems*. New York : Oxford University Press, 1998.
- [GGRV85] J.J. Grefenstette, R. Gooal, B. Rosamaita, and VanGucht. Genetic algorithm for traveling salesman problem. In *Proceedings of International Genetic Algorithm*, 1985.
- [GL85] D.E. Goldberg and R.Jr. Lige. Traveling salesman problem. In *Proceedings of International Genetic Algorithm 1*, 1985.
- [Gla] A. S. Glassner. Spacetime ray tracing for animation. *IEEE Trans. Computer Graphics and Applications*, Vol. 8, No. 2.
- [IH00] Larry S. Davis Ismail Haritaoglu, David Harwood. W4:real-time surveillance of people and their activities. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 8, pp. 809–830, 2000.
- [ISO98] Temporal schema, ISO/TC211, 1998.
- [ISO99a] Spatial schema, ISO/TC211, 1999.
- [ISO99b] Terminology, ISO/TC211, 1999.
- [JH01] Gaetano Borriello Jeffrey Hightower. Location systems for ubiquitous computing. *IEEE Computer*, Vol. 34, No. 8, pp. 57–66, 2001.
- [JR 東 00] JR 東日本総合技術開発推進部. 旅客流動計測システムの開発, 2000.
<http://www.jreast.co.jp/technology/buisiness/system/>.

- [KS86] R. Kowalski and M. Sergot. A logic-based calculus of events. *New Generation Computing*, Vol. 4, pp. 67–95, 1986.
- [KSH91] H. Kitano, S.F. Smith, and T Higuchi. Ga-1:a parallel associative memory processor for rule learning with genetic algorithms. In *Proceedings of International Conference of Genetic Algorithm 91*, 1991.
- [Lan92] G. Langran. *Time in geographic information systems*. London : Taylor and Francis, 1992.
- [L.W00] L.Wixson. Detecting salient motion by accumulating directionally-consistent flow. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 8, pp. 774–780, 2000.
- [MB00] Vera Kettmaker Matthew Brand. Discovery and segmentation of activities in video. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 8, pp. 844–851, 2000.
- [MCB⁺01] Gerard Medioni, Isaac Cohen, Francois Bremond, Somboon Hongeng, and Ramakant Nevatia. Event detection and analysis from video streams. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 23, No. 8, pp. 873–889, 2001.
- [McD] D. McDermott. A temporal logic for reasoning about processes and plans. *Cognitive Science*, Vol. 6, No. 2.
- [MN01] Ryosuke Shibasaki Masanobu Nakamura, Huijing Zhao. Tracking passenger movement with infrared video data. In *The 22nd Asian Conference on Remote Sensing*, Vol. 2, pp. 1520–1523, 2001.
- [M.ド00] M.ドバークほか. コンピュータ・ジオメトリ. 近代科学社, 2000. 浅野哲夫 訳.
- [NI01] Ryosuke Shibasaki Nobuaki Ishihira, Huijing Zhao. Tracking passenger movement with ground-based laser scanner. In *The 22nd Asian Conference on Remote Sensing*, Vol. 2, pp. 1516–1519, 2001.
- [NMO00] Alex P. Pentland Nuria M. Oliver, Barbara Rosario. A bayesian computer vision system for modeling human interactions. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 8, pp. 831–843, 2000.
- [Peu95] J. Peuquet. An event-based spatiotemporal data model (estdm) for temporal analysis of geographical data. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 9, pp. 7–24, 1995.
- [RC00] Larry S. Davis Ross Cultler. Robust real-time periodic motion detection, analysis, and applications. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 8, pp. 781–796, 2000.
- [Ris83] J. Rissanen. A universal prior for integers and estimation by minimum description length. *Annals of Statistics*, Vol. 11, pp. 416–431, 1983.
- [RM01] Ryosuke Shibasaki Ryuichi Murata. Tracking automobiles using air-borne tls (three line scanner) images. In *The 21st Asian Conference on Remote Sensing*, 2001.
- [Rob87] G Robertson. Parallel implementation of genetic algorithms in classifier system. In *Genetic Algorithms and Simulated Annealing*. Morgan Kaufmann Publishers, 1987.
- [SH96] R. Shibasaki and S. Huang. Spatio-temporal interpolation by integrating observational data and a behavioral model. *Advances of GIS (Proceedings of Spatial Data Handling)*, pp. 251–265, 1996.
- [Shi94] R. Shibasaki. Handling spatio-temporal uncertainties of geo-objects for dynamic update of gis databases from multi-source data. In *International Society for Photogrammetry and Remote Sens-*

- ing Com3 Midterm Symposium, pp. 761–768, 1994.
- [Sto97] O. Stock, editor. *Spatial and temporal reasoning*. Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [Tan89] R Tanese. Distributed genetic algorithms. In *Proceedings of International Conference of Genetic Algorithm 89*, 1989.
- [WM00] Toshikazu Wada and Takashi Matsuyama. Multiobject behavior recognition by event driven selective attention method. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 8, pp. 873–887, 2000.
- [伊庭 99] 伊庭齊志. 進化論的計算の方法. 東京大学出版会, 1999.
- [伊理 95] 伊理正夫, 今野浩, 刀根薫. 最適化ハンドブック. 朝倉書店, 1995.
- [伊理 97] 伊理正夫, 腰塚武志. 計算幾何学と地理情報処理. 共立出版, 1997.
- [奥村 00] 奥村誠, 和泉孝嗣, 塚井誠人. 大規模学会における参加者流動の予測手法. 土木計画学研究・講演集, 第 23 巻, pp. 287–290, 2000.
- [岡本 00] 岡本篤樹, 鈴木明宏, 李竜煥, 朝倉康夫, 田名部淳. PEAMON(Personal Activity MONitor) の開発と機能実験. 土木計画学研究・講演集, 第 23 巻, pp. 659–662, 2000.
- [岡本 01] 岡本篤樹, 近藤勝直, 朝倉康夫, 田名部淳. 狭域調査における PHS システムによる位置特定機能の利用可能性について. 土木計画学研究・講演集, 第 24 巻, 2001.
- [海老 95] 海老原学, 掛川秀史. オブジェクト指向に基づく避難・介助行動シミュレーションモデル. 日本建築学会計画系論文集, No. 467, pp. 1–12, 1995.
- [関本 99] 関本義秀, 柴崎亮介. 時空間データ統合におけるフィーチャーの表現方法のレビュー. 地理情報システム学会第 2 回バーチャルカンファレンス, 1999.
- [喜村 00] 喜村祐二, 朝倉康夫, 羽藤英二. PHS による位置特定データを用いたイベント観客の行動分析. 土木計画学研究・講演集, 第 23 巻, pp. 279–282, 2000.
- [亀田 98] 亀田弘行, 角本繁, 畑山満則. 災害緊急時と平常の連携による総合防災情報システムの構築—リスク対応型地域空間情報システムの実現に向けて (1) . 地理情報システム学会講演論文集, pp. 29–32, 1998.
- [原裕] 原裕貴, 北上始, 中島淳. 時間概念の表現とデフォルト推論. 人工知能学会誌, Vol. 3, No. 2, pp. 216–223.
- [高玉 98] 高玉圭樹. マルチエージェントによる組織学習の方法に関する研究. PhD thesis, 東京大学, 1998.
- [高島 01] 高島他. 特集「家庭の情報化」. 情報処理, Vol. 42, No. 11, pp. 1047–1081, 2001.
- [国土 99] 国土空間データ基盤推進協議会. 空間情報技術入門. 国土空間データ基盤推進協議会, 1999.
- [黒木 98] 黒木進, 牧之内顕文. 位相空間データモデル Universe での空間、時間、時空間データ表現. 電子情報通信学会データ工学研究専門委員会、情報処理学会データベースシステム研究会 合同研究会データベースワークショップ, 1998.
- [三菱 01] 三菱電機. Video surveillance system development, 2001. <http://www.rwcp.or.jp/lab/mm-mitsubishi/VS/index.html>.
- [山根 00] 山根高志, 小松喜一郎, 眞鍋信太郎. 本厚木駅前広場における歩行者の流動について-ビデオ撮影調査による歩行者流動パターンの把握-. 日本建築学会大会, pp. –, 2000.
- [山西 92] 山西健司, 韓太舜. MDL 入門. 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 3, pp. 427–434, 1992.
- [山村 92] 山村雅幸, 小野貴久, 小林重信. 形質遺伝を重視した遺伝的アルゴリズムに基づく巡回セールス

- マン問題の解法. 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 6, 1992.
- [柴崎 96] 柴崎亮介, 稲葉和雄, 平井雄, 太田守重, 村上真幸, 今井浩, 奥山祥司, 佐藤潤. 地理情報に関する ISO 標準化の現状. 写真測量とリモートセンシング, Vol. 35, No. 6, pp. 4–22, 1996.
- [柴崎 99] 柴崎亮介, 村上広史, 村尾吉章, 三宅敏和, 太田守重, 黒岩昇, 山本譲, 大野武士, 笹川正, 渡辺誠, 津留宏介. わが国における GIS 標準化の現状と課題. 写真測量とリモートセンシング, Vol. 38, , 1999.
- [小根 97] 小根山裕之, 桑原雅夫. 路側観測交通量からの時間変化する OD 交通量の推定. 交通工学, Vol. 32, No. 2, pp. 5–16, 1997.
- [小西 01] 小西勇介. 自律方式による歩行者用ポジショニングシステム. Master's thesis, 東京大学, 2001.
- [小林 87] 小林潔司. エントロピー理論と都市・交通モデリングへの適用. 土木計画学会講演集, pp. 291–298, 1987.
- [森本 00] 森本章倫, 中村文彦, 牧村和彦, 村上智章. 万歩計を用いた歩行者交通調査に関する基礎的研究. 土木計画学研究・講演集, 第 23 巻, pp. 655–658, 2000.
- [清水 99] 清水英範, 四童子隆, 布施孝志. 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. 写真測量とリモートセンシング, Vol. 38, No. 4, pp. 53–58, 1999.
- [青木 01] 青木邦友. 「IPCar システム」によるデータ収集実験. 交通工学, Vol. 36, No. 3, pp. 48–50, 2001.
- [石塚 96] 石塚満. 知識の表現と高速推論. 丸善, 1996.
- [赤池 76] 赤池弘次. 情報量基準 AIC とは何か. 数理科学, No. 153, pp. 5–11, 1976.
- [折原 01] 折原他. 特集「家庭内ネットワークと情報家電」. 人工知能学会誌, Vol. 16, No. 3, pp. 349–376, 2001.
- [太田 99] 太田守重. GIS のための時空間スキーマ. GIS ー理論と応用, Vol. 7, No. 1, 1999.
- [大森 00] 大森宣暁. 詳細な時空間データを用いた活動交通シミュレーションに関する研究. PhD thesis, 2000.
- [大沢 98] 大沢裕, 金景月. 離散的な時系列管理方式の一提案. 地理情報システム学会講演論文集, pp. 107–112, 1998.
- [朝倉 00] 朝倉康夫, 羽藤英二, 大藤武彦, 田名部淳. PHS による位置情報を用いた交通行動調査手法. 土木学会論文集, No. 653, pp. 95–104, 2000.
- [朝倉 01] 朝倉康夫, 羽藤英二. 特定地区に集中する交通需要の適正化・分散方策～移動体通信による位置データの利用可能性～. 土木計画学シンポジウム論文集, 第 37 巻, pp. 263–269, 2001.
- [田所 00] 田所諭, 北野宏明, 監修. ロボカップレスキュー. 共立出版, 2000.
- [二神 00] 二神彩, 亀谷一洋, 山中英生, 小川哲也. 中心市街地における歩行者・自転車の回遊行動分析. 土木計画学研究・講演集, 第 23 巻, pp. 623–626, 2000.
- [飯村 98] 飯村威他. 空間情報と時系列情報の統合化に関する研究ー土地・建物情報管理のためのプロトタイピングー. 地理情報システム学会講演論文集, pp. 113–117, 1998.
- [片山 94] 片山恒雄, 山崎文雄, 目黒公郎, 永田茂, 大槻明, 横山秀史. 地震火災時の人間の避難行動に関する実験およびシミュレーション研究. Technical report, 東京大学生産技術研究所耐震防災工学研究室, 1994.
- [麻生 97] 麻生英樹, 赤穂昭太郎, 本村陽一. 統計的推論と AI の推論. 人工知能学会誌, Vol. 12, pp. 196–203, 1997.

謝辞

柴崎研には修士1年の時から5年間在籍させて頂いたが、その間にキャンパスも六本木から閑静で緑あふれる駒場に移り、また多くの人が研究室に入りまた出て行った。その中で本当に様々な人にお世話になり充実した研究生活を送ることができた。

指導教官の柴崎先生には何から何までお世話になった。特に研究の進め方、論文の書き方については、私自身が右も左も分からず道を外しそうになることが多々あった中で粘り強く指導頂き本当に感謝している。先生の常に物事の本質を捉え、リスクをバランスよく管理しつつ失敗を恐れず突き進む姿勢、また常に社会に貢献できる研究をする、というスタンスで様々な立場の人と幅広い関係を構築していく様子は、非常に勉強になった。そのような極めて多忙な立場にも関わらず気さくにしかも熱心にディスカッションして頂いた事は今後の私の財産になるだろう。

またすでに退官された村井先生、あるいは安岡先生、越智さん、藤野さん、史先生にも研究室のセミナーや学会活動等で様々な御指導を頂いた。

また研究室の多くの学生にも本当にお世話になった。現在の学生だけでなくすでに卒業された諸先輩方、あるいは後輩、客員でいらした研究員、留学生など名前を挙げればきりが無いほどである。とくに研究面に関しては、賀川君（現日立ソフト）、田仲君、また研究活動のバックアップとして秘書の道重さん、宮澤さん、長島さんにも非常にお世話になった。

外部の方々にも様々な面でお世話になった。GISの分野に関しては、副査である岡部先生、清水先生、有川先生からは色々な局面での確かなアドバイスを頂いた。また OOGIS（Object-Oriented GIS 分科会：現 SIT）では国際航業の太田さん、松浦さん、あるいは GIS 学会時に中央大学の伊理先生、京都大学の角本先生、畑山さん、武蔵工業大学の厳先生からもコメントを頂いた。

また交通分野では AR21(Arterial21 プロジェクト)において、副査である桑原先生、桑原研究室の小根山さん、西川さん、井料君、都立大学の片倉先生、大口先生、千葉工大の赤羽先生、高知工科大の吉井先生、ITL の堀口さんには、色々とお世話になった。ここで、交通シミュレータとその実装に関わる勉強をさせて頂いたのは大きな財産になるであろう。また交通 GIS プロジェクトでは原田先生、大森助手、古谷助手、また長大の方にもいろいろ教えて頂いた。交通研究室の寺部先生、加藤先生からも鉄道と人の関係について教えて頂いた。

さらに測量技術大会の実験時には、都市交通計画研究所の岡本さん、田名部さん、李さんに PEAMON の事を1から10までお世話になった。特に岡本さんには実験当日にもアンテナの配置からテストデータの取得まで手伝って頂き非常に勉強になった。また長大の方からもトラフィックカウンタを貸して頂いた。日本測量協会の小野さん、丸山さんには実験のための手続きを色々と整えて頂いた。東京ビッグサイトという集客力のある場所のイベントでこのような計測をさせて頂けるのは非常にラッキーなことであり、今後この「人を測る」プロジェクトを続けていくことは非常に意味のあることに思われる。さらには安岡研究室、測量研究室、交通研究室、千葉大学本多・梶原研究室の学生からも手伝って頂いた。

同期の学生でありお互い切磋琢磨していった榊原君、あるいは測量研究室の布施君、福田君（現東工大助手）にも感謝し、これからも研究に関するディスカッションや愚痴などを言えたら良いと思う。

最後に、いい年をして自宅通学し、「パラサイト」研究生活を満喫させてくれた両親に心から感謝をしたい。