

道路ネットワークの複雑さと マルチエージェントシミュレーションとの関連性についての考察

Consideration about relevance with complexity of a road network and multi-agent simulation

*1瀬戸口 陽一
Yoichi Setoguchi

*1荒井 亮太
Ryota Arai

*2伊藤 暢浩
Nobuhiro Ito

*3岩田 員典
Kazunori Iwata

*1金田 洋平
Yohei Kaneda

*1犬塚 信博
Nobuhiro Inuzuka

*1和田 幸一
Koichi Wada

*1名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

*2愛知工業大学
Aichi Institute of Technology

*3愛知大学
Aichi University

In a research area of agents, it is a challenge to get method to evaluate behavior of agents and multi-agent system. And the evaluation depends on the environment where agents act. In this paper, in order to clarify relevance of evaluation of agents and environment of agents, I analyse of the road network which is one of the environment of agents. And I consider relevance with an analysis result of a road network and multi-agent simulation.

1. はじめに

エージェントに関する研究分野では、開発されたエージェントやマルチエージェントシステムの能力の評価方法を整備することが重要な課題として挙げられている [1]。また、能力の評価は、エージェントが活動する環境に依存しているといわれている。そのため、エージェントと環境との依存関係を考慮した上でエージェントの評価を行うためには、その依存関係を明らかにする必要がある。そして、この依存関係を明らかにするためには、環境について解析する必要がある。

このような背景に対して本研究では、エージェントとして地図データや環境にもつ自律ロボット型のエージェントに着目する。そして環境である地図データの中でも、特にエージェントと密接な関係があると考えられる道路に関する情報に注目し、その特徴の解析を行う。そして、地図データの道路に関する情報の解析結果とマルチエージェントシミュレーションとの関連性を考察する。これにより、エージェントの能力と環境である地図データの依存関係を明らかにする。

2. マルチエージェントシステム

エージェントとは、自律的に行動する主体であり、社会性・反応性・自発性といった特性をもつ [1]。またマルチエージェントシステムとは、複数のエージェント同士が相互作用を通じて、困難な問題を解決するシステムである。ここで本研究におけるエージェントとは、「外部環境である実世界との相互作用に基づいて状況を認識し、自律的に行動する主体」とする。

エージェントに関する研究分野では、開発されたエージェントやマルチエージェントシステムの能力を評価する手段・方法を整備することが重要な課題として挙げられている。なぜなら、評価方法が存在しないことが、エージェントに関する理論・実装の発展や実用化の妨げとなっているからである。また、エージェントの能力の評価は、エージェントが活動する環境に依存している。その例として以下のような場合が挙げられる。

- (i) ある環境 E で異なるエージェント A_1, A_2 が動作したとき、どちらのエージェントがその環境 E において適切に

連絡先: 瀬戸口 陽一, 名古屋工業大学, 愛知県名古屋市昭和区御器所町, TEL:052-735-5408, FAX:052-735-5408, aerith@phaser.elcom.nitech.ac.jp

動作したかを判断することはできても、その動作結果に対する優劣の関係が環境 E 以外の環境においても成り立つとは限らない。

- (ii) エージェント A_1 は環境 E_1 で、エージェント A_2 は環境 E_2 で動作したとき、その動作結果からどちらのエージェントが優れているか比較することは難しい。

よってエージェントやマルチエージェントシステムの能力を評価するためには、この依存関係を明らかにする必要がある。そして、この依存関係を明らかにするためには、環境について詳細に検討する必要がある。そこで本研究では、エージェントの能力とその環境である実世界との依存関係を明らかにするために、実世界を情報化した地図データの解析を行う。地図データの構成要素(道路, 鉄道, 河川, 建物, 地形など)の中でも特に道路に関する情報に注目し、その特徴を解析することを考える。なぜなら、エージェントにとって地図データ上を移動する能力は最も基本的で重要な能力であり、この能力と密接な関係がある地図データの構成要素は道路だからである。

3. 地図データと道路ネットワーク

3.1 国土地理院の数値地図 25000

地図データとして国土地理院の数値地図 25000[2] を用いる。なぜなら、信頼性が高く、入手が容易だからである。

数値地図 25000 の道路に関するデータは、道路節点と道路区間の二つに分類できる。道路節点とは、交差点や行き止まり、道路と道路のつなぎ目などを表現するものであり、主に「ID」、「緯度」、「経度」というデータをもつ。道路区間とは、道路を表現するものであり、主に「ID」、「種別」、「幅員」、「この道路区間の端点を表す二つの道路節点のID」というデータをもつ。

3.2 道路ネットワークの定義

数値地図 25000 の道路に関するデータを利用して、以下のように道路ネットワークに関する定義を行う

定義 1 点集合, 道路集合

点集合 V とは、点 v の集合である。点とは、緯度 *longitude*、経度 *latitude* をもつものである。また道路集合 E とは、道路 e の集合である。道路とは、点 $v_{head} \in V$ から点 $v_{tail} \in V$ に接続し、長さ *length*、幅員 *width* という重みをもつものである。

定義 2 道路ネットワーク

道路ネットワークは、重み関数 l, w をもつ重みつき有向グラフ $G = (V, E)$ である。重み関数 $l: E \rightarrow \mathbf{R}$ とは、道路に長さ (実数値) を与える関数である。重み関数 $w: E \rightarrow \mathbf{R}$ とは、道路に幅員 (実数値) を与える関数である。

道路ネットワーク G は、 x 軸を経度 *latitude*、 y 軸を緯度 *longitude* とした x - y 直交座標系に配置されるものとする。そして G の各点 $v \in V$ は、直交座標系における座標 (*latitude*, *longitude*) に配置される。また G の各道路 $e \in E$ は、直交座標系に配置された点対を結んだ線分である。ただしこの道路ネットワークは、次の三つの性質をもつ。

- (i) 強連結である。(ii) 任意の点で自己ループは存在しない。
- (iii) 任意の点対で同方向の複数の道路は存在しない。

4. 道路ネットワーク複雑さの指標

4.1 諸定義

定義 3 最短経路距離

道路ネットワーク $G = (V, E)$ において、経路 $p = \langle v_0, v_1, \dots, v_k \rangle$ の距離とは、その経路を構成する道路の重みの和 $l(p) = \sum_{i=1}^k l(v_{i-1}, v_i)$ である。点 u から点 v への最短経路とは、その距離が $\delta(u, v) = \min\{l(p) \mid p \text{ は点 } u \text{ から点 } v \text{ への経路}\}$ である経路であり、 $\delta(u, v)$ を最短経路距離という。

定義 4 有効道路率, 有効道路長率, 有効道路面積率

道路ネットワーク $G = (V, E)$ において、

$$\text{有効道路率を } \frac{|E_{WR}|}{|E|}, \text{ 有効道路長率を } \frac{\sum_{e_2 \in E_{WR}} l(e_2)}{\sum_{e_1 \in E} l(e_1)},$$

$$\text{有効道路面積率を } \frac{\sum_{e_2 \in E_{WR}} l(e_2) \times w(e_2)}{\sum_{e_1 \in E} l(e_1) \times w(e_1)} \text{ とする。}$$

ただし、 $E_{WR} = \{(v_h, v_t) \mid w(v_h, v_t) \geq 5.5m\}$ である。

定義 5 最大フロー

道路ネットワーク $G = (V, E)$ において、 s を入口とし、 t を出口とする ($s, t \in V$)。このとき、 G におけるフローとは、次の二条件を満たす $f: E \rightarrow \mathbf{R}$ のことである。(i) 容量条件: 全ての $(u, v) \in E$ に対して、 $f(u, v) \leq w(u, v)$ でなければならない。(ii) フロー保存則: 任意の $u \in V - \{s, t\}$ に対して、 $\sum_{(u, v) \in E} f(u, v) = \sum_{(v, u) \in E} f(v, u)$ でなければならない。 $f(u, v)$ を道路 (u, v) のネットフローと呼び、道路 (u, v) の点 u から点 v へのフローを表す。

このとき最大フロー $|f_{max}|$ は、入口 s と出口 t をもつ道路ネットワーク G において、次式で表される。

$$|f_{max}| = \max\{\sum_{(s, u) \in E} f(s, u) \mid \sum_{(s, u) \in E} f(s, u) = \sum_{(v, t) \in E} f(v, t)\}$$

定義 6 交差点率

道路ネットワーク $G = (V, E)$ において、交差点率を $\frac{|V_I|}{|V|}$ とする。ただし、 $V_I = \{v_I \in V \mid (id_{v_I} \geq 3) \wedge (od_{v_I} \geq 3)\}$ であり、 id_{v_I}, od_{v_I} はそれぞれ点 v_I の入次数、出次数とする (集合 V_I の要素を交差点と呼ぶ)。点の出次数とはその点から出る道路の個数、入次数とはその点に入る道路の個数である。

定義 7 区画整理率

道路ネットワーク $G = (V, E)$ において、 $a_{x \rightarrow v \rightarrow z}$ を道路 (x, v) と道路 (v, z) の角度とする ($0^\circ < a_{x \rightarrow v \rightarrow z} \leq 180^\circ$, $x, v, z \in V$, $x \neq v \neq z$)。このとき、区画整理率を $\frac{|A_{AR}|}{|A|}$ とする。ただし、 $A = \{a_{x \rightarrow v \rightarrow z}\}$ であり、 $A_{AR} = \{a_{x \rightarrow v \rightarrow z} \mid (75^\circ \leq a_{x \rightarrow v \rightarrow z} \leq 105^\circ) \vee (165^\circ \leq a_{x \rightarrow v \rightarrow z} \leq 180^\circ)\}$ である。

定義 8 直進率, 距離に対する直進率

道路ネットワーク $G = (V, E)$ において、点 v_0 から点 v_n への最短経路を $p_{v_0 \rightsquigarrow v_n} = \langle v_0, v_1, \dots, v_n \rangle$ 、経路 $p_{v_0 \rightsquigarrow v_n}$ の距離を δ_{v_0, v_n} としたとき、直進率を $\frac{|V_S v_0, v_n|}{|V_M v_0, v_n|}$ 、距離に対する直進率を $\frac{|V_S v_0, v_n|}{\delta_{v_0, v_n}}$ とする。

ただし、 $V_M v_0, v_n = \{v_1, \dots, v_{n-1}\}$ であり、 $V_M v_0, v_n$ の要素を最短経路中間点と呼ぶ。また、 $V_S v_0, v_n = \{v_i \mid v_i \in V_M v_0, v_n, a_{v_{i-1} \rightarrow v_i \rightarrow v_{i+1}} \geq 170^\circ, 1 \leq i \leq n-1\}$ であり、 $a_{v_{i-1} \rightarrow v_i \rightarrow v_{i+1}}$ を道路 (v_{i-1}, v_i) と道路 (v_i, v_{i+1}) の角度とする ($0^\circ < a_{v_{i-1} \rightarrow v_i \rightarrow v_{i+1}} \leq 180^\circ$, $v_{i-1}, v_i, v_{i+1} \in V$, $v_{i-1} \neq v_i \neq v_{i+1}$)。本研究では、 $a_{v_{i-1} \rightarrow v_i \rightarrow v_{i+1}} \geq 170^\circ$ のとき、最短経路中間点において直進したという。

定義 9 局所道路連結度

道路ネットワーク $G = (V, E)$ において、二点 $m, n \in V$ を到達可能でなくするために必要な道路の最小個数を、二点 m, n 間の局所道路連結度という。ただし、 m から n への経路が存在するとき、 m と n は到達可能であるという。

定義 10 道路使用回数率

道路ネットワーク $G = (V, E)$ において、道路 $e \in E$ が全点対の最短経路によって使用された累積回数を u とする。また、全点対の最短経路数の総和を、 $u_{max} = \sum_{i, j \in V} n_{i, j}$ とする。ただし、 $n_{i, j}$ を任意の二点 $i, j \in V$, $i \neq j$ における最短経路の数とする。

このとき、道路 e の道路使用回数率を $\frac{u}{u_{max}}$ とする。

4.2 複雑さの指標

本研究では、道路ネットワークの特徴のことを「道路ネットワークの複雑さ」と呼び、以下のように定義する。

定義 11 道路ネットワークの複雑さの指標

道路ネットワークの複雑さを長さ、幅員、密度、ゆがみ、脆弱度の五つに分け、それぞれの複雑さを複数の計算項目により数値化する。そして、それぞれの複雑さを表す十三の計算項目全てを道路ネットワークの複雑さの指標という。

(a) 長さに関する複雑さ

二点間がどれだけ離れているかを表す。「全ての道路の長さ *length* の平均値」、「全点対の最短経路距離の平均値」を計算することにより数値化される。

(b) 幅員に関する複雑さ

道幅がどれだけ広いかを表す。「全ての道路の幅員 *width* の平均値」、「有効道路率」、「有効道路長率」、「有効道路面積率」、「全点対の最大フローの平均値」を計算することにより数値化される。

(c) 密度に関する複雑さ

道路や点がどれだけ密集しているかを表す。「交差点率」を計算することにより数値化される。

(d) ゆがみに関する複雑さ

見通しがどれだけ良いかを表す。「区画整理率」、「全点対の直進率の平均値」、「全点対の距離に対する直進率の平均値」を計算することにより数値化される。

(e) 脆弱度に関する複雑さ

ある道路が通行止めになった場合、道路ネットワークが分断してしまう道路が、どれだけ存在するかを表す。「全点対の局所道路連結度の平均値」、「道路使用回数率の最大値」を計算することにより数値化される。

5. 実験

5.1 実験方法

国土地理院が公開している数値地図 25000 の地図データから、複数の市町村の地図データを選択し、各地図データに対して、以下の二種類のシミュレーションを行う。そして、定義した道路ネットワークの複雑さの指標である十三の計算項目と、シミュレーションの結果との相関係数を調べることで、指標とシミュレーションの関連性を考察する。

(1) 車両移動シミュレーション

自動車をモデル化したエージェント（車両エージェント）が地図データの道路ネットワークにおいて、どのように移動するかを検証できるシミュレーションである。

(2) デマンドバスシミュレーション

バスをモデル化したエージェントが、地図データ上で発生する利用者の要望（デマンド）をどのように処理するかを検証できるシミュレーションである。ここでデマンドバスとは、決められたある地域内で、デマンドに応じて乗降場所や乗降時間を自由に変更する運行携帯をとるバスであり、デマンドバスを用いた交通システムをデマンドバスシステムという。

5.2 車両移動シミュレーション

5.2.1 車両移動シミュレータ

車両移動シミュレーションを行うにあたり、我々が独自に開発した車両移動シミュレータを使用する。このシミュレータでは、地図データ上の任意の点（出発地）から任意の点（目的地）までを、一台の車両エージェントがどのように移動するかを検証することができる。

5.2.2 車両エージェント

車両エージェントとは、普通自動車をモデル化したものである。車両エージェントは、現在走行している道路の制限速度と等しい速度で移動し、交差点を右左折するときは減速する（但し減速する度合は、その道路の種別や右左折する角度により異なる）。また本シミュレーションでは、経路選択アルゴリズムが異なる、以下の二種類の車両エージェントを用いる。

(a) 車両エージェント A：現在値から目的地までの最短経路を走行する。

(b) 車両エージェント B：現在値から目的地までの移動時間が最小となる経路を走行する。ここで移動時間とは、現在値から目的地までの最短経路を、その経路の制限速度（右左折時の減速も考慮する）で走行した場合に要する時間である。

5.2.3 地図データ

本シミュレーションでは、日本の全国各地の市町村の地図データの中から、28 地域の地図データを選択し、選択した各地図データに対して車両移動シミュレーションを行う。

5.2.4 評価指標

車両移動シミュレーションにおいて、車両エージェントがどの程度効率良く目的地まで到達できたかを評価する指標として、以下の二つの指標を定義する。

(a) 移動時間：車両エージェントが出発地から目的地まで移動したときに要した時間

(b) 平均速度：車両エージェントが出発地から目的地まで移動したときの速度の平均

5.2.5 結果と考察

シミュレーション結果より、道路ネットワークの複雑さの指標

と、評価指標との相関係数を求めた。車両エージェント A(以下 A) と車両エージェント B(以下 B) に対して、相関係数の絶対値が 0.6 以上の項目について、表 1 と表 2 にそれぞれ示す。

表 1: 複雑さの指標と A の評価指標との相関係数

評価指標	A の移動時間	A の平均速度
道路の長さ	0.7367	0.5997
最短経路距離	0.9368	0.5616
交差点率	-0.8386	-0.2641
局所道路連結度	-0.7158	-0.2617

表 2: 複雑さの指標と B の評価指標との相関係数

評価指標	B の移動時間	B の平均速度
道路の長さ	0.7571	0.3722
最短経路距離	0.9424	0.3649
有効道路率	-0.2645	0.6695
有効道路面積率	-0.3420	0.6236
交差点率	-0.8507	-0.0552
局所道路連結度	-0.7323	-0.0538

表 1 と表 2 より、移動時間は A と B とともに道路の長さ、最短経路距離と強い正の相関があり、交差点率、局所連結度と強い負の相関があることがわかる。このことから、A と B とともに目的地までの距離が短く、目的地までの経路が多く存在するほど、少ない時間で目的地まで到達できることがわかる。

また、平均速度は A と B とともに、移動時間より相関は弱くなったが、B は幅員に関する複雑さとやや強い正の相関が得られた。この理由として次の二つの理由が考えられる。(i) 幅員が大きいほど制限速度が高くなる。(ii) B は移動時間が最小となるように経路を選択するため、A よりも制限速度が高くなる経路を選びやすい。

以上の結果から、以下のことがいえる。

- 長さに関する複雑さが小さく、交差点率・局所連結度が高いほど、移動時間が短くなる。
- エージェントのアルゴリズムにより、複雑さの指標と評価指標との関連性が異なる場合がある。

5.3 デマンドバスシミュレーション

5.3.1 デマンドバスシミュレータ

デマンドバスシミュレーションを行うにあたり、我々が独自に開発したデマンドバスシミュレータを使用する。シミュレーションは、以下の流れで進行する（図 1 参照）。

1. 利用者がデマンドを出し、センターにその情報を送信する。
2. センターは、受信したデマンドを処理するのに最適なバスを選択する。そしてそのバスにデマンドの情報を送信し、デマンドを割り当てる。
3. 各バスは、センターから割り当てられたデマンドを処理するために最適な経路を計算し、デマンドを処理する。

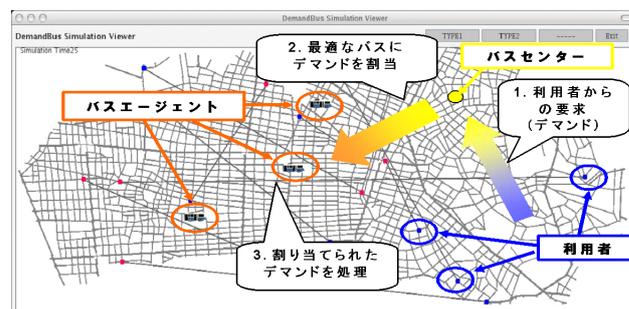


図 1. デマンドバスシミュレーションの様子

5.3.2 地図データ

本シミュレーションでは、日本の全国各地の市町村区の地図データの中から、16 地域の地図データを選択し、選択した各地図データに対してデマンドバスシミュレーションを行う。

5.3.3 シミュレーションの初期設定

デマンドバスシステムにおけるデマンドの発生数は、通常人口が多い地域ほど多くなり、それにともないバス台数も多く必要になると考えられる。一方、本実験では道路ネットワークの複雑さとデマンドバスシステムの評価との関連性を明らかにすることを目的としている。しかし、設定するパラメータに道路ネットワーク以外の要素が含まれると、関連性の考察が複雑になってしまう。そこで、本実験では、次の二種類の設定でシミュレーションを行う。

(i) 実験 1: デマンドの発生数・バス台数を地図データの面積比に比例して設定する (道路以外のパラメータが全ての地図データでできるだけ等しくなるように設定する)。

(ii) 実験 2: デマンドの発生数・バス台数を人口比に比例して設定する (できるだけ現実を再現して設定する)。

上述以外の初期設定の詳細について、以下に述べる。

(a) デマンドに関する設定

デマンドの希望乗車・降車場所は、地図データ上の点の中から一様分布で選択する。また、デマンドはポアソン分布に従って発生させる。

(b) バスに関する設定

バスは、現在値から目的地までの最短経路を走行する。

(c) センターのデマンド割り当てアルゴリズム

デマンドの割り当てアルゴリズムは、近年盛んに研究が行われているが、現実にデマンドの割り当てアルゴリズムを用いたシステムの導入例は見当たらない。そこで、本実験ではデマンドバスの研究分野で多く研究されているノード挿入法 [4] を取り上げ、デマンドの割り当てアルゴリズムとして用いる。

5.3.4 評価指標

デマンドバスシステムを評価する指標として、以下の三つの指標を定義する。

(a) 利便性: 利用者一人あたりの希望降車時刻からの先行時間の平均

(b) 採算性 1: 単位時間におけるバス 1 台あたりのデマンド処理数

(c) 採算性 2: バスの単位走行距離あたりのデマンド処理数

5.3.5 結果と考察

実験 1 のシミュレーション結果から、複雑さの指標と各評価指標との相関係数を求めた。相関係数の絶対値が 0.6 以上の項目について、表 3 に示す。

表 3: 複雑さの指標と評価指標との相関係数 (実験 1)

評価指標	利便性	採算性 1	採算性 2
最短経路距離	-0.8156	-0.1785	-0.8718
道路使用回数率	-0.6460	-0.3894	-0.6601

表 1 から、利便性・採算性 2 は、最短経路距離と強い相関、道路使用回数率とやや強い相関があることが分かる。このことから、デマンドバスシステムは二点間の距離が短く、現地からある地点までの経路が多数存在する地図ほど、利用者に快適さを提供でき、デマンドの処理効率が良くなることがわかった。

また、実験 2 のシミュレーション結果から、複雑さの指標と各評価指標との相関係数を求めた。相関係数の絶対値が 0.6 以上の項目について、表 4 に示す。

表 4: 複雑さの指標と評価指標との相関係数 (実験 2)

評価指標	利便性	採算性 1	採算性 2
道路の長さ 最短経路距離	-0.6776 -0.8019	-0.8800 -0.5077	-0.8218 -0.8950
道路の幅員 最大フロー	0.7452 0.7295	0.7156 0.7301	0.6038 0.5862
交差点率	0.5368	0.7301	0.5633
区画整理率 直進率	0.5131 0.353	0.7443 0.7523	0.5314 0.4182
距離に対する直進率	0.6225	0.7705	0.5624
局所道路連結度	0.4436	0.6793	0.5928

表 4 からわかるように、最短経路距離では実験 1 と同程度の相関が得られた。しかし実験 1 とは異なり、幅員や密度、ゆがみ、脆弱度といった多くの複雑さの指標とも、やや強い相関が得られ、全体的に複雑さの指標と各評価指標との相関が強くなっている。この理由として、実験 2 ではデマンドバスシステムの環境の一部である、デマンドの発生数とバス台数が地図データごとに異なっており、道路ネットワーク以外の要素が、エージェントの評価に大きな影響を与えているからであると考えられる。そのため、デマンドバスシステムと環境のより詳細な関連性を明らかにするためには、人口密度など道路ネットワーク以外の環境の構成要素にも着目して、デマンドバスシステムとの関連性について分析する必要があると考えられる。

6. まとめと今後の課題

本研究では、道路ネットワークの複雑さの指標を定義し、その指標とマルチエージェントシミュレーションにおけるエージェントの評価との関連性について考察を行った。その結果、エージェントの評価と道路ネットワークの複雑さの指標の間には、関連性があることがわかった。また、道路ネットワークの複雑さの指標の中でもエージェントに最も影響を与える指標は、シミュレーションの種類や初期設定、エージェントのアルゴリズムなどによって異なることもわかった。これらの結果は、以下のような場面で活用できると考えられる。

- あるエージェントを、最も効率良く動作させることができる地図データを特定する。
- ある地図データにおいて、効率よく動作できるエージェントの特徴を導き出す。
- 環境との依存関係を考慮したうえで、エージェントを評価する手法を提案する。

今後の課題として、より現実に即した多くのマルチエージェントシミュレーションと複雑さの指標との関連性について調べることや、地図データにおける道路ネットワーク以外の構成要素の数値化、能力の評価方法の提案などが挙げられる。

参考文献

- [1] 木下哲男, 菅原研次. エージェント指向コンピューティング ~ エージェントの基礎と応用 ~. ソフトリサーチセンター, 1995.
- [2] 国土地理院 <http://www.gsi.co.jp/>
- [3] 浅野哲夫, 岩野和生, 梅尾博司, 山下雅史, 和田幸一. アルゴリズムイントロダクション 第一巻 = 数学的基礎とデータ構造. 近代科学社, 1995
- [4] 内村圭一, 前田竜士. 動的な交通情報を用いたリアルタイム Dial-a-Ride システムの構築. 電子情報通信学会論文誌 A Vol.J88-A, No.2, 2005.