USJにおける最適巡回路

2004MM010 古澤祥多　2004MM017 橋本有香　2004MM054 中島大輔
指導教員: 佐々木 美裕

1 はじめに

1.1 研究目的

テーマパークへ行くたびに，どのアトラクションから乗ればより多く乗れるか毎回悩む．人気のアトラクションで長時間待たされて思うようにアトラクションが乗れなかった経験がある人も少なくないだろう．特にユニバーサル・スタジオ・ジャパンやディズニーランドといった人気テーマパークでは閉園時間に間に合わず希望のアトラクションに乗れない場合も考えられる．各地のテーマパークでは，ファストパスや優先券を利用して渋滞の緩和策が考えられている．このような渋滞緩和策と講じたとしても，人数や時間帯の状況で必ずしも待ち時間が解消されるとは限らない．また，大勢でテーマパークへ行った場合，必ずしも自分の乗りたい乗り物にばかり乗れるわけでわない．それぞれの乗りたいアトラクションに乗れなければ満足したとは言いがたい．本研究では，ユニバーサル・スタジオ・ジャパンを例として最短距離や最短時間で顧客がより多くの満足を得られるような巡回路を考える．

1.2 過去の研究

巡回セールスマン問題(TravelingSalesmanProblem)とは，多くの都市と各都市間の移動コストが与えられたとき，全ての都市を一度だけ周って戻ってくる経路のうちコストが最小のものを求める（セールスマンが所定の数の都市を1回だけ巡回する場合の最短経路を求める）問題である．巡回セールスマン問題の応用として，配送計画問題や，小学校，中学校，高等学校，大学などのスクールバスの効率的な巡回路の計画，郵便や新聞などの配達経路，ごみの収集経路の計画などがあげられる[4].

2 研究方針

2.1 算定方法

本研究では，この問題を巡回セールスマン問題として定式化し，CPLEXで解く．さらに移動時間・待ち時間・乗車時間を考慮した経路を求めるモデルを提案する．

2.2 対象地域

大阪府にあるユニバーサル・スタジオ・ジャパン(UNIVERSAL STUDIOS JAPAN)を研究対象とする．数あるアトラクションの中から，主要アトラクションを16個選び（ユニバーサル・スタジオ・ジャパン・スタジオガイド[2]より），各アトラクションに関して運休は考えず全て乗車可能なものとする．各アトラクションによって人気の格差はあるが，できる限り顧客の満足を得るようなアトラクションの巡回路を考える．

2.3 アトラクションの位置説明

ユニバーサル・スタジオ・ジャパンの代表的なアトラクションの位置や各アトラクション間で移動可能な経路を図1で示す．また，表1でアトラクションの番号と名前の関係を示している．各アトラクション間の距離は地図上でキルビメータを用いて（地図[1]の上で転がして）最短距離を測定する．測定の際には，地図の上をキルビメータで何度か測り，その平均を使用する．また，地図上ではアトラクションの出入口がわからないので，各アトラクションの建物の中央から一番近い道に出ると仮定し，距離を求める．

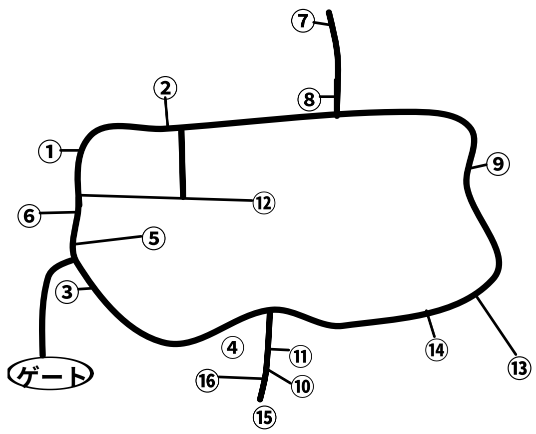

図 1: アトラクション経路図

2.4 満足度について

各顧客(グループのメンバーを「顧客」と呼ぶ)のアトラクションに対する満足度を0から9までの数値で設定した．これを満足度とする．またグループの顧客は共に行動をするものとする．顧客の数とそれに対する満足度のデータが必要なのだが，今回は例として私たち3人を顧客とし，3人のアトラクションに対するそれぞれの満足度をデータとして与え，問題を解いた．用いたデータを表2に示す．

3 総移動距離最小の巡回路

3.1 記号の定義

定式化にあたり，次の記号を定義する．

I : アトラクションの集合
N : アトラクションの個数
d_{ij} : アトラクション(i,j)間の距離
A : 枝の集合$\{(i,j) \mid i,j \in I, i \neq j\}$

表 1: アトラクション

番号	アトラクション名
1	ターミネータ 2:3-D
2	アメージング・アドベンチャー・オブ・スパイダーマン・ザ・ライド
3	セサミストリート 4-D ムービーマジック シュレック 4-D アドベンチャー
4	ユニバーサル・モンスター・ライブ・ロックンロール・ショー
5	アニメ・セレブレーション
6	E.T.アドベンチャー
7	バック・トゥ・ザ・フューチャー・ザ・ライド
8	バックドラフト
9	ジュラシック・パーク・ザ・ライド
10	スヌーピー・サウンド・ステージ・アドベンチャー
11	スヌーピープレイランド
12	ハリウッド・マジック
13	ウォーターワールド
14	ジョーズ
15	スヌーピー・アクション・ステージ
16	アニマル・アクターズ・ステージ

表 2: 顧客iのアトラクションpに対する満足度

$i \setminus p$	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	4	3	0	0	8	1	8
2	0	5	0	0	2	1	0	1
3	8	4	3	2	1	8	0	8

$i \setminus p$	9	10	11	12	13	14	15	16
1	8	7	0	8	8	9	5	6
2	4	1	0	0	8	2	0	3
3	8	0	9	8	4	0	4	0

次に変数の定義を行う.

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 \cdots \text{アトラクション} i \in I \text{から} \\ \quad \text{アトラクション} j \in I \text{へ行くとき} \\ 0 \cdots \text{アトラクション} i \in I \text{から} \\ \quad \text{アトラクション} j \in I \text{へ行かないとき} \end{cases}$$

u_i : 部分巡回路排除制約の為のダミー変数

3.2 定式化

$$\sum_{(i,j)\in A} d_{ij} x_{ij} \to \min \tag{1}$$

$$s.t. \quad \sum_{j\in I} x_{ij} = 1 \quad (i \in I) \tag{2}$$

$$\sum_{i\in I} x_{ij} = 1 \quad (j \in I) \tag{3}$$

$$u_i - u_j + N x_{ij} \le N - 1 \quad (i, j = 2, \cdots, N) \tag{4}$$

$$u_i \ge 0 \quad (i \in I) \tag{5}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i, j \in A) \tag{6}$$

制約条件の説明

制約条件(2): アトラクション$i \in I$から出ていく枝は一つ.
制約条件(3): アトラクション$i \in I$に入っていく枝は一つ.
制約条件(4): 部分巡回路排除制約式.
制約条件(5): ダミー変数の非負制約.

3.3 実行結果

先述したモデルにより，以下のような結果が得られた.
最適巡回路:ゲート-5-6-1-2-12-8-7-9-13-14-16-15-10-11-4-3-ゲート
総移動距離(m):3256

3.4 考察

今回の計算結果は，移動時間や待ち時間や乗車時間や満足度等を考慮せず，移動の距離の最小化だけを考えた場合である．その結果，各アトラクションを円を描くようにまわる方法が最も最短ということがわかり、3256mで全てのアトラクションを回ることができることが分かった．また，人の歩く速度を分速50mとすると65.12分で回ることができることを示す．次に各人の満足度を考慮した場合の巡回路を求めるモデルを考える.

4 満足度と距離を考慮した巡回路

4.1 満足度と距離を考慮した巡回路(二段階モデル)

次は各人がより満足を得られ，かつ最短距離になるような巡回路を求めていく．なお，アトラクションは5個の場合と10個の場合を考えた.
初めに二段階モデルを示す．第一段階では各顧客の満足度を考慮し，指定した数のアトラクションを選択する．第二段階では第3章で示した最短距離を求めるモデルを用いて選択したアトラクションの最適巡回路を求める.

4.1.1 記号の定義

まず定式化にあたり，記号を定義する.
I : アトラクションの集合
P : 顧客の集合
W_{pi} : 顧客$p \in P$のアトラクション$i \in I$に対する満足度
n : 選択するアトラクション数
L : 各人の満足度の合計の最小値

次に変数の定義を行う.

$$y_i = \begin{cases} 1 \cdots \text{アトラクション} i \in I \text{を選択するとき} \\ 0 \cdots \text{アトラクション} i \in I \text{を選択しないとき} \end{cases}$$

4.1.2 定式化

$$L \to \max \tag{7}$$
$$s.t. \quad \sum_{i \in I} y_i = n \tag{8}$$
$$\sum_{i \in I} W_{pi} y_i \geq L \quad (p \in P) \tag{9}$$
$$y_i \in \{0,1\} \quad (i \in I) \tag{10}$$

制約条件の説明
制約条件(8): 選択するアトラクションの総数はnである.
制約条件(9): 各人の満足度の合計の最小値

4.1.3 実行結果

[5個のアトラクションを選択する場合]
最適巡回路：ゲート-4-8-2-1-6ゲート
総移動距離(m)：1992
満足度：57
[10個のアトラクションを選択する場合]
最適巡回路：ゲート-4-11-14-13-7-8-12-2-1-6-ゲート
総移動距離(m)：2954
満足度：98

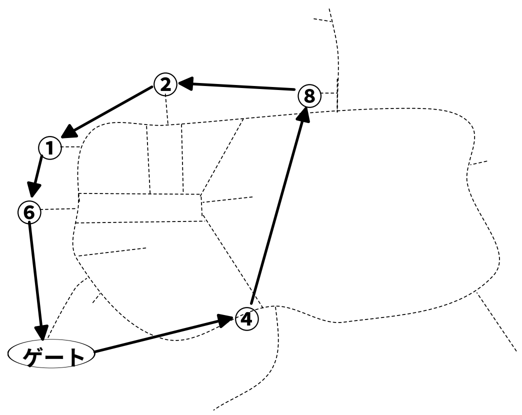

図 2: 5個のアトラクションを選択する場合の最適巡回路

4.1.4 考察

選択するアトラクションが5個の場合では円を描くように巡回していることがわかる[図2]. 選択するアトラクションが10個の場合も同様である. また, 人の歩く速度を分速50mとすると, 5個のアトラクションを選択する場合37.62分, 10個のアトラクションを選択する場合50.92分で回ることができることがわかった. 今回は, 満足度を考慮した上でアトラクションを選出し, さらにそのアトラクションのみで最適巡回路を求めた(二段階法). そこで次は, 満足度と最短距離を同時に考慮したモデルを考える.

4.2 満足度と距離を同時に考慮した巡回路

満足度を最大にしながら, 距離を最小にする計算を一度に求めるモデルを示す. その後, 先述したモデルと比べてどのくらい誤差があるか比較してみる.

4.2.1 記号の定義

定式化にあたり, 記号を定義する.
I : アトラクションの集合
d_{ij} : アトラクション(i,j)間の距離
A : 枝の集合$\{(i,j) \mid i,j \in I, i \neq j\}$
P : 顧客の集合
W_{pi} : 顧客$p \in P$のアトラクション$i \in I$に対する満足度
n : 選択するアトラクション数
α : 距離と満足度の比率を等しくするための定数
L : 各人の満足度の合計の最小値
次に変数の定義を行う.

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 \cdots \text{アトラクション}i \in I\text{から} \\ \quad \text{アトラクション}j \in I\text{へ行くとき} \\ 0 \cdots \text{アトラクション}i \in I\text{から} \\ \quad \text{アトラクション}j \in I\text{行かないとき} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1 \cdots \text{アトラクション}i \in I\text{を選択するとき} \\ 0 \cdots \text{アトラクション}i \in I\text{を選択しないとき} \end{cases}$$

u_i : 部分巡回路排除制約の為のダミー変数

4.2.2 定式化

$$L - \alpha \sum_{(i,j) \in A} d_{ij} x_{ij} \to \max \tag{11}$$
$$s.t. \quad \sum_{j \in I} x_{ij} = y_i \quad (i \in I) \tag{12}$$
$$\sum_{j \in I} x_{ji} = y_i \quad (i \in I) \tag{13}$$
$$u_i - u_j + n x_{ij} \leq n - 1 \quad (i, j = 2, \cdots, n) \tag{14}$$
$$\sum_{i \in I} y_i = n \tag{15}$$
$$\sum_{i \in I} W_{pi} y_i \geq L \quad (p \in P) \tag{16}$$
$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (i,j \in A) \tag{17}$$
$$y_i \in \{0,1\} \quad (i \in I) \tag{18}$$
$$u_i \geq 0 \quad (i \in I) \tag{19}$$

制約条件の説明
制約条件(12): アトラクション$i \in I$を選択するときアトラクション$i \in I$から出ていく枝が一つ存在する.
制約条件(13): アトラクション$i \in I$を選択するときアトラクション$i \in I$に入っていく枝が一つ存在する.
制約条件(14): 部分巡回路排除制約式である.
制約条件(15): 選択するアトラクションの総数はnである.
制約条件(16): 各人の満足度の合計の最小値

4.2.3 実行結果

[5個のアトラクションを選択する場合]
最適巡回路：ゲート-3-6-5-4-11-ゲート
総移動距離(m)：1282

満足度：47

[10個のアトラクションを選択する場合]
最適巡回路：ゲート-3-4-11-14-9-8-2-1-6-5-ゲート
総移動距離(m)：2221
満足度：106

4.2.4　考察

選択するアトラクションが5個の場合も10個の場合も，二段階モデルと同じように円を描くように巡回している．また，人の歩く速度を分速50mとすると10個のアトラクションを選択する場合40.16分，5個のアトラクションを選択する場合27.18分で回ることができることがわかる．

今回では α の値を，選択するアトラクションが10個の場合0.0374，また選択するアトラクションが5個の場合0.0483として入力したところ，目的関数の値が0に近い値となり，満足度と距離の比率がほぼ同じになった．満足度と距離の比率を同じにすることにより，満足度が高く距離も短い巡回路を導き出すことができた．この α の値（重み）を変えることにより満足度と距離の優先度を変えることができる．

5　移動時間・待ち時間・乗車時間を考慮した時間の最小化

5.1　貪欲算法

本節では，4.1節のモデルを用いて満足度が最大となるアトラクションを選出し，移動時間・待ち時間・乗車時間を考慮しながらそれらのアトラクションのみで時間が最小となる巡回路を求める．ノードから次のノードを選ぶ際には，移動時間，待ち時間，乗車時間を合計した時間が最小になるノードを選択する．なお，巡回するアトラクションは，4章のモデルを用いて選出する．今回も5個のアトラクションを選出する場合と，10個のアトラクションを選出する場合とで考え，それぞれの最適巡回路を求める．

5.1.1　記号の定義

定式化にあたり，記号を定義する．
I: アトラクションの集合
T: 時間帯の集合
E_{ij} : アトラクション$i \in I$からアトラクション$j \in I$への移動時間
W_{it} : アトラクション$i \in I$の時刻$t \in T$における待ち時間
r_i : アトラクション$i \in I$の乗車時間
t_e : 開園から閉園までの時間
s: 所要時間
C_l:l番目に乗車するアトラクションの番号

5.1.2　計算手順

手順0

$\bar{I} := I, k := 0, l := 0, s := 0, C_l := 0$
と初期設定する．

手順1

$$t := \min_{j \in \bar{I}} (E_{kj} + W_{j(s+E_{kj})} + r_j) \tag{20}$$

$$k := \arg\min_{j \in \bar{I}} (E_{kj} + W_{j(s+E_{kj})} + r_j) \tag{21}$$

とする．

$$s + t + E_{k0} \geq t_e \tag{22}$$

(22)式が成立するならば手順3へ進み
成立しないならば手順2へ進む．

手順2
$l := l+1, C_l = k, \bar{I} := \bar{I} - k, s := s + t$とする．$\bar{I} = \o$ならば手順3へ進む．
そうでなければ手順1へ進む．

手順3
$s := s + E_{k0}$として終了．

5.1.3　実行結果

[5個のアトラクションを選択する場合]
最適巡回路:ゲート-8-4-1-6-2-ゲート
所要時間(分):369.66

[10個のアトラクションを選択する場合]
最適巡回路:ゲート-1-2-4-6-8-7-13-14-11-12-ゲート
所要時間(分):526.80

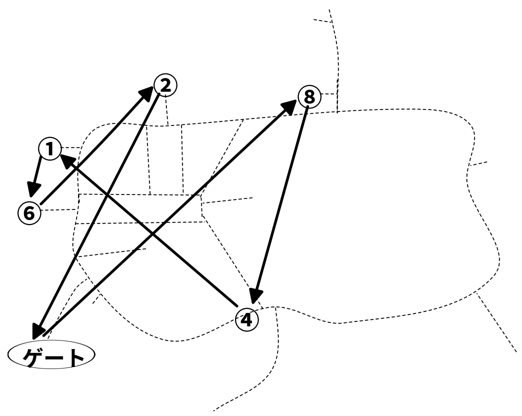

図 3: 5個のアトラクションを選択する場合の最適巡回路

5.1.4　考察

選択するアトラクションが5個の場合では円を描くように巡回していないことがわかる[図3]．選択するアトラクションが10個の場合も同様に巡回路は円を描くように巡回しておらず，距離が長く同じルートを通ったり交差していたりするのが分かる．一見最適な巡回路ではないように思えるが，本節では距離は考慮せず時間が最小となる巡回路を求めているためこのような結果が得られたと考えられる．

5.2 全探索

移動距離，待ち時間，乗車時間を考慮し，所要時間の最小化を目的とする最適巡回路と最短時間を求める．貪欲算法とは異なり巡回路をすべて探索する.貪欲算法では，ノードから次のノードを選ぶ際には，移動時間，待ち時間，乗車時間を合計した時間が最小になるノードを選択する方法をとったが，今回はすべての巡回路を考え，所要時間が最小となる巡回路を最適巡回路とした．前節と同様に，アトラクション5個を選出する場合と10個を選出する場合で考え，また現実には昼食や休憩の時間も必要であるので，11時から14時までの間に必ず1時間の休憩をとらなければならないとし，昼食をとる場合ととらない場合を考えた．アトラクションの選出方法については前節と同じように，満足度が最大となるアトラクションを求めるモデルでアトラクションを選出した．

5.2.1 記号の定義

定式化にあたり，記号を定義する．
I: アトラクションの集合
t: 巡回路の所要時間
P : 乗車するアトラクション番号
t_p : p番目のアトラクションに到着するまでにかかる時間
d_{ij} : アトラクション$i \in I$からアトラクション$j \in I$への移動時間
W_{it} : アトラクション$i \in I$の時刻$t \in T$の待ち時間
r_i : アトラクション$i \in I$の乗車時間

Pはアトラクションの番号ではなく巡回する順番に沿って乗るアトラクションに番号を割り振っていく．順列によってすべてのを巡回路を考える．
ゲートから出発し{ 0(ゲート) → 1 → 2 → 3 → 4 → ⋯ → 0(ゲート)} に帰ってくるまでの時間を求める手順を示す.

一番目のアトラクションに乗り終わるまでの時間

$$t_1 = d_{01} + W_{1(d_{01})} + r_1 \tag{23}$$

各アトラクションに乗り終わるまでの時間を求める

$$t_2 = t_1 + d_{12} + W_{2(t_1+d_{12})} + r_2 \tag{24}$$
$$t_3 = t_2 + d_{23} + W_{3(t_2+d_{23})} + r_3 \tag{25}$$

・
・

このようにアトラクションpを乗り終わるまでの時間を求める．

$$t_p = t_{p-1} + d_{(p-1)p} + W_{p(t_{p-1}+d_{(p-1)p})+r_p} \tag{26}$$

ゲートに戻ってくるまでの時間

$$t = t_p + d_{p0} \tag{27}$$

これらをまとめると，

$$t = \sum_{p \in P} d_{(p-1)p} + \sum_{p \in P} W_{p(d_{(p-1)p}+t_{p-1})} + \sum_{p \in P} r_p + d_{p0} \tag{28}$$

と表すことができる．すべての巡回路を列挙し，所要時間を求める．その中で所要時間が最小となる巡回路を求める．

5.2.2 実行結果

[5個のアトラクションを選択する場合の結果]
最適巡回路:ゲート-1-2-4-8-6-ゲート
所要時間(分):295.66

[5個のアトラクションを選択し，昼食を考慮するときの結果]
最適巡回路:ゲート-1-2-4-8-6-17-ゲート
所要時間(分):384.76

[10個のアトラクションを選択する場合の結果]
最適巡回路:ゲート-1-2-4-6-8-7-13-14-11-12-ゲート
所要時間(分):507.56

[10個のアトラクションを選択し，昼食を考慮するときの結果]
最適巡回路:ゲート-1-6-17-2-7-13-8-4-11-14-12-ゲート
所要時間(分):549.64

5.3 考察

3章で距離のみを考慮して求めた巡回路とは違い，4章では巡回路が円を描くように巡回していない．昼食の時間を考える場合，今回では昼食の時間を一時間と設定したため，昼食をとらない場合と比較すると単純に所要時間が一時間増加すると思いがちだが，実際にはアトラクション10個の場合では，42.08分の違いしかなかった．これは，昼食の時間を考える事により，巡回路を回るための所要時間が増え，待ち時間のデータで取りうる時間帯の幅も広がるため，このような結果になったと考えられる．

5.4 結果の比較と考察

[アトラクション5個の場合の巡回路と所要時間]
貪欲算法(相対誤差：25.02％)
ゲート-8-4-1-6-2-ゲート:369.66(分)
全探索
ゲート-1-2-4-8-6-ゲート:295.66(分)

[アトラクション10個の場合の巡回路と所要時間]
貪欲算法(相対誤差：3.79％)
ゲート-11-12-8-13-5-4-1-14-7-2-ゲート:526.80(分)
全探索
ゲート-1-2-4-6-8-7-13-14-11-12-ゲート:507.56(分)

6　時間を考慮した満足度最大の巡回路

本章では，移動時間・待ち時間・乗車時間を考慮し，満足度を最大にする巡回路を求める．

6.1　記号の定義

まずダイヤグラムを作成するにあたり，記号を定義する．

I : アトラクションの集合

T : 時刻の集合$(0, 1, 2, \cdots)$

N_{it} : アトラクション$i \in I$の時刻$t \in T$におけるダイヤグラム上のノード

W_{it} : アトラクション$i \in I$の時刻$t \in T$における待ち時間

r_i : アトラクション$i \in I$の乗車時間

d_{ij} : アトラクション$i \in I$からアトラクション$j \in I$までの移動時間

t_e : 開園から閉園までの時間

はじめに，図4に示すダイヤグラムを以下の手順で作成する．

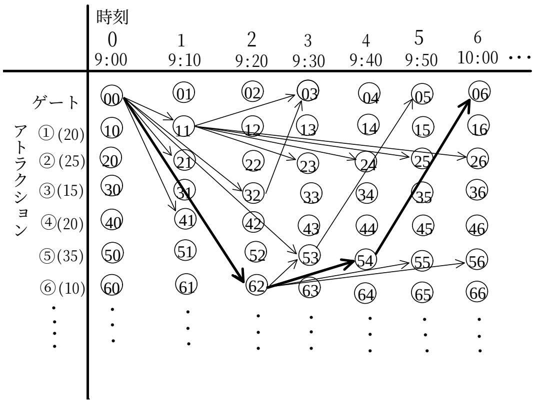

図 4: ダイヤグラム

図4の説明

時間は全て10分刻みとする．アトラクション番号の右の括弧の中の数字は，そのアトラクションの満足度を表している．本章での満足度とは，アトラクション $i \in I$ に対する顧客全員の満足度の合計とする．またダイヤグラム上のノードに与えられた番号は左が i (アトラクション番号)，右が t (時刻の番号)を表している．太い矢印で示してあるパスについては後述する．

手順

$10t + W_{it} + r_i + d_{ij} \leq 10t'$ かつ $j \neq i$ のとき $N_{it} \to N_{jt'}$ に枝を張る．上式の左辺は，アトラクション $i \in I$ からアトラクション $j \in I$ に到着するまでの最早の時間を表す．また $10t$ は時刻0から何分経過したかを表している．すなわち，時刻 $t \in T$ にアトラクション $i \in I$ に到着して乗車をし，その後アトラクション $j \in I$ に時刻 $t' \in T$ に到着できることを表す．1つのアトラクションには最大1回しか行かず，制限時間内に満足度の合計が最大になるようなパス(N_{00}を出発し,$N_{0t}(t \leq t_e)$に到着するパス)をダイヤグラム上で探索する．また巡回路は，必ずゲート(N_{00})から出発するものとする．その条件のもと，いろいろなパスを作ることができる．

パスの説明

例として図4の太い矢印で示してあるパスは「時刻9:00にゲート(N_{00})を出発し，移動時間20分でアトラクション6(N_{62})に到着．次にアトラクション6のその時点での待ち時間，乗車時間，アトラクション5までの移動時間の合計が20分でアトラクション5(N_{54})に到着．最後に，アトラクション5のその時点での待ち時間，乗車時間，ゲートまでの移動時間の合計が20分でゲート(N_{06})に到着.」ということを示している．またこのときの満足度は「ゲート→アトラクション6(10)→アトラクション5(35)→ゲート」と巡回しているため10＋35＝45となる．このようなパスの中で，満足度が最も高くなるものをみつける．

6.2　実行結果

各乗車時間やアトラクション間の距離に関しては，ホームページ等で調べて分かったのだが，待ち時間に関しては10分刻みの細かいデータが得られなかったため，今回は仮のデータを使用した．満足度は同じだが異なった巡回路は全部で4つ見つかった．しかしどの巡回路もアトラクションを巡回する順番が違うだけで，巡回するアトラクションは同じだったため，例として1つだけ巡回路を示す．括弧内の数字は各アトラクションへの到着時刻を表す．

巡回路の数：4

最適巡回路：ゲート(9:00)-13(9:20)-9(10:30)-8(11:10)-14(12:10)-11(13:00)-12(13:40)-2(14:50)-15(15:50)-6(17:00)-10(18:00)-16(19:50)-ゲート(20:50)

満足度：149

7　終わりに

本研究をまとめると，最適の巡回路を求めるには何を優先するかによって求める方法が変わってくる．距離を優先するのであれば多少なりとも多くの時間を費やしてしまうし，時間を優先するのであれば円を描いて巡回する事がなくなり多く距離を歩くような巡回路を求めてしまう．研究を行なうにあたってそれぞれの良い所，悪い所が分かった．

参考文献

[1] 地図データ
`http:maps.google.com/maps?q=%E5%A4%A7%E9%98%AA%E5%BA%9C&hl=ja`

[2] ユニバーサル・スタジオ・ジャパン・スタジオガイド

[3] 真野祐樹，佐藤久義，種村美穂：テーマパークのＯＲ－愛知万博を例としてー，2005年度南山大学数理科学科卒業論文要旨集，PP.12-17.

[4] 後藤壮智，石井大輔：配送問題の研究，2006年度南山大学数理科学科卒業論文要旨集，PP.166-169.