

歩行者数に着目した任意形状の閉路における 単一リンクの最適敷設モデル

田中 健一

キーワード：交通手段選択、歩行者数、閉路ネットワーク、リンクの敷設

本稿は、御前 汐莉さんの2015年度慶應義塾大学理工学部管理工学科卒業論文をもとに加筆修正したものです。

1. 問題の簡単な説明と得られた結果

都市や地域において、人々が移動する際に用いられる交通手段はさまざまです。なかでも、徒歩による移動は、ほかの車両などによる移動と比較して、環境への負荷や占有する空間が少なく済むという特徴があります。そのため、都市空間において、徒歩による移動者数を見積もったり、道路網の形状に応じて移動者数が変化する様子を分析したりすることは重要なテーマです。

本研究は、このテーマに数理モデルによるアプローチを試みたものです。特に、都市内に存在する湖や建築物などの障害物の外周を閉路（ぐるっと一回りできる道）とみなし、領域の内部を横断するリンク（湖であれば橋など）を敷設する問題を取り上げました。そして、リンクを敷設する前後において、歩行者数や車両による移動距離の総和を数理的に導き、上記の問題を定量的に分析した結果を紹介します。

2. 問題の設定と考え方

一般に、徒歩による移動は、距離が十分短いときのみに行われ、距離の増大に伴って自転車や車などのほかの交通手段が用いられます。これを表現するために、距離 r を移動する人が徒歩を選択する確率 $p(r)$ を

$$p(r) = \exp(-\lambda r) \quad (1)$$

と表し、 $p(r)$ を歩行者選択確率とよびます（図1）。ここで、 λ は事前に決めておく正の定数で、距離の増大に

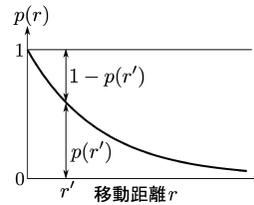


図1 歩行者選択確率

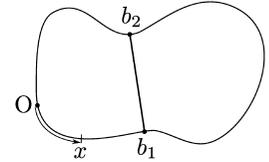


図2 閉路とリンク

伴って、歩行者を選択する割合が減少する度合いを表します。歩行者選択確率を用いれば、都市内のさまざまな地点間を移動する人々全体のうち、歩行者を選択する人数（総歩行者数）はどの程度いるのか、また、都市全体で車両による移動距離の合計（総車両利用距離）はどの程度になるのか、といった重要な問題に接近することができます。上記の指標が、都市の広さや人口密度、交通インフラの整備水準の違いによって、どのような影響を受けるかを分析することは重要です。

こうした問題を数理的に扱う第一歩として、図2のような閉路に着目し、これに単一のリンクを敷設する問題を考えます。そして、総歩行者数と総車両距離がリンクの敷設前後でどのように変化するかを追求します。たとえば、都市内に存在する湖や池、建築物や公園などは、そこを直接の目的地としない移動者にとっては障害物となりえます。領域内部を横断可能なリンクが敷設された場合、車で外周を迂回していた移動者が徒歩で領域内部を横切る移動に切り替えることも起こりえます。リンクの敷設効果を総歩行者数や総車両利用距離から見積ろうというわけです。

3. 定式化

図2のような、周長が l の閉路状のネットワークを考え、原点 O から反時計回りに座標軸を設定します。ここで、移動の起点と終点は、この閉路に沿って連続的に存在するものとします。また、移動の起点と終点は、閉路上で一様かつ独立に分布すると考えます。これらは、重要な基礎となるケースを数理的に扱いやす

たなか けんいち
慶應義塾大学 理工学部
〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1
ken1tnk@ae.keio.ac.jp

い形で記述するための仮定です。なお、移動需要に偏りがある場合でも、移動需要関数を適切に設定すれば、同様に追求可能です。リンクの両端点の座標を、それぞれ b_1, b_2 とし（ただし $b_1 \leq b_2$ ）、リンクの長さを $d = d(b_1, b_2)$ と表します。さらに、以下を仮定します。

- (i) 移動は最短経路に沿って行われる；
- (ii) 敷設するリンクはその両端点を結ぶ直線で与える。

上記の仮定の下で、総歩行者数と総車両利用距離を導出しました。実際にこの計算を行うには、閉路上のあらゆる移動の起点と終点のペアについて、最短経路を特定しなければなりません。この作業は、リンクの敷設前は、右回りと左回りのみを考慮すればよいので比較的容易ですが、リンクの敷設後は、リンクを通過するケースが最短となる場合も考慮する必要があるため複雑です。

ここでは詳しい導出過程は省略しますが、リンクの敷設前の総移動者数 t_{before} と敷設後の総移動者数 $t_{\text{after}}(b_1, b_2)$ は次のように導かれます：

$$t_{\text{before}} = \frac{2N}{\lambda l} (1 - e^{-\frac{1}{2}\lambda l}), \quad (2)$$

$$t_{\text{after}}(b_1, b_2) = \frac{2N}{l^2} \left\{ \frac{4}{\lambda^2} e^{-\lambda d} + \frac{4 - 2\lambda d}{\lambda^2} e^{-\frac{1}{2}\lambda l} + \frac{(b_1 - b_2 + d)\lambda - 4}{\lambda^2} e^{-\frac{1}{2}\lambda(b_2 - b_1 + d)} + \frac{(b_2 - b_1 - l + d)\lambda - 4}{\lambda^2} e^{-\frac{1}{2}\lambda(l + b_1 - b_2 + d)} + \frac{l}{\lambda} \right\}. \quad (3)$$

ここで、 N は全移動者数を表します。導出結果は省略しますが、総車両利用距離についても同様にして導出できます。

4. 数値例と考察

ここでは、図3に示す多角形の周を閉路ネットワークと考え、総歩行者数の計算例を示します。図3において周長を $l = 1 \text{ km}$ 、距離抵抗係数を $\lambda = 1 \text{ km}^{-1}$ 、 $N = 100$ 人と設定します。

図4に、任意のリンクの位置 (b_1, b_2) に対する、総歩行者数 $t_{\text{after}}(b_1, b_2)$ の概形を示します。総歩行者数のピークが存在する様子がわかります。このリンクの位置を数値的に求めると、図3の太い黒色で示した位置が得られました。この結果は直感的にも納得できます。

同様のシナリオで、総車両利用距離も導出し、最も望ましい場所にリンクを敷設した場合の効果を数値的に見積った結果、表1のようになりました。リンクの敷設後に、総歩行者数は2.6%程度増加し、総車両利用距離は26%程度減少しました（26という数字の並びの一致は偶然です）。この例のように、やや細長い形状

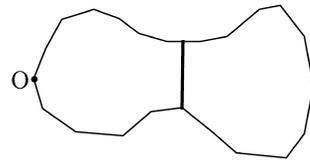


図3 例題の閉路と総歩行者数を最大化するリンクの位置

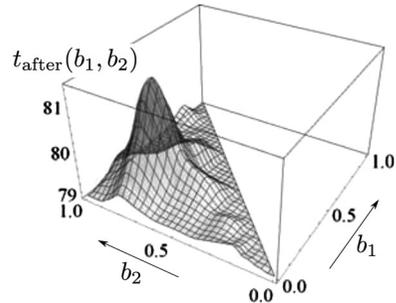


図4 リンク位置と総歩行者数の関係

表1 リンク敷設前と敷設後の総歩行者数と総車両利用距離

	総歩行者数	総車両利用距離
リンク敷設前	78.69人	6.96 km
リンク敷設後	81.28人	5.14 km

で、くびれた部分をもつ領域では、大きなリンクの敷設効果が期待できます。

5. まとめと展望

本研究では、歩行という視点から、迂回を発生させる都市内の障害物を閉路状のネットワークで表現し、これを横断するリンクを配置する効果を記述するための数理モデルを構築しました。

なお、徒歩という交通モードを選択する確率に正面から取り組んだ研究に Tirachini [1] があります。また、リンク敷設問題を扱った初期の研究に Rosenhead [2] があります。本研究のように、総歩行者数や総車両距離を明示的に導出し、リンクの敷設効果を分析した研究は行われていないようです。もっと複雑な道路網を考えたり、信号における待ち時間を考えたりと、このモデルを土台としてさまざまな方向へ展開することで、数多くの重要な研究を追求していくことができそうです。

参考文献

- [1] A. Tirachini, "Probability distribution of walking trips and effects of restricting free pedestrian movement on walking distance," *Transport Policy*, **37**, pp. 101-110, 2015.
- [2] J. Rosenhead, "The optimum location of transverse transport links," *Transportation Research*, **7**, pp. 107-123, 1973.