

Random Walk と Levy Flight に基づく探索方法の比較

小山 英朗 生天目 章

防衛大学校電機情報学群情報工学科

〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20

E-mail: g46047@nda.ac.jp, nama@nda.ac.jp

あらまし ランダムに存在する目標を最も効率的に探索する方法に関しては、多くの分野で長い間研究されてきた。最近、探索空間の広さと比較してわずかにしか存在しない稀少資源や目標を探索するとき、Levy Flight に基づく探索は Random Walk に基づく探索よりも効果的であると報告されている[1]。しかしながら、両モデルに基づく効率性の定量的比較や資源密度と効率的な探索の関係及び目標が移動する時の効率的な探索法などについては、まだ十分に研究されていない。本研究は、Random Walk に基づく探索と Levy Flight に基づく探索を定量的に比較する。特に、目標到達までに要するステップ数を比較し、目標密度の違いによる影響について比較する。また、目標が移動するとき、両モデルによる探索効率に変化が現われるかを実験する。その結果、希少な目標を探索するには、Random Walk 探索よりも Levy Flight 探索法の方がはるかに効率的であることを示す。

Keyword Random Walk, Levy Flight

Comparison of efficiency of Random walk based search and Levy flight search

Hideaki Koyama Akira Namatame

Dept. of Computer Science, National Defense Academy in Japan

Address: 1-10-20, Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa 239-8686, JAPAN

E-mail: g46047@nda.ac.jp, nama@nda.ac.jp

Abstract What is the best strategy for efficient search of randomly located targets? This question has been studied in many fields. Recently it is reported that Levy Flight search is more efficient than Random Walk based search in sparsely target site. It has not also been argued that quantitative comparison, relation of between density and efficient search or efficiency of searching when target is moving. In this study we have comparison study of Random Walk and Levy Flight. And we compare efficiency of searching of Random Walk and Levy Flight. At first, we experimented that influence of changing percentage of target sites in number of steps until which reaches target site. Secondly, we experiment that whether the change appears in detection efficiency when the target site is moving. As a result, regardless of stationary and moving, we are able to appear that the detection efficiency of Levy Flight search far exceeds that of Random Walk search under sparsely target site.

Keywords Random Walk, Levy Flight

1. はじめに

正確な位置があらかじめ知られていないランダムに配置された目標を探索する上で、最も効果的な探索方法はこの疑問は、様々な分野で長い間研究されている[2]。生物に関する分野では、動物の採餌行動に関係づけられている[3,4]。

探索者の移動方法としては、一般的には Random Walk がある。このモデルは、ネットワーク上でのガウス過程や連続なマルコフ過程などの確率過程モデルと関連し、ブラウン運動として扱われることが多い[5,6]

Random Walk モデルにおいて、移動距離をべき分布に従うとすることで、正の履歴を持つ Random Walk (Levy Flight という)になる。履歴を持たない通常の Random Walk (すなわちブラウン運動)と比較すると、Levy Flight はさまざまな異なる特性を持つことが知られている。

例えば、ある領域内にわずかに存在する餌や目標を探索する問題では、通常の Random Walk と比較して、捕獲能力や探知確率が高まることが知られている。また、数種類の動物の Levy Flight に基づく採餌行動を調べると、べき指数が2で、それは最適な探索方法であることが報告されている[2]。

これまでの研究において、探索空間の広さと比較してわずかにしか存在しない稀少資源や目標を探索するとき、Levy Flight に基づく探索は Random Walk に基づく探索よりも効果的であると報告されている。しかしながら、両モデルに基づく効率性の定量的比較や資源密度と効率的な探索の関係及び目標が移動する時の効率的な探索法などについては、まだ十分に研究されていない。

本論では、まず目標が稀少な場合とそうでない密集した場合とで Random Walk の探索方法と Levy Flight の探索方法の効率性について、目標到達までに要するステップ数を比較し、目標密度の違いによる影響について定量的に比較する。次に、目標が移動するとき、両方のモデルによる探索効率に変化が現われるかを実験する。

2 探索モデル

2.1 Random Walk モデル

このモデルにおいて、エージェントは、領域内の任

意の地点から出発し、方向性として $[0, 2\pi]$ からランダムに選択された方向へ、さらに移動距離 $[0, 10]$ からランダムに選択された距離で別の地点へ移動する。

目標地点に到着したエージェントは、その地点に目標が存在すれば、そこで探索を終了する。目標が存在しなければ、また別の地点へと移動する、といった動作を繰り返す。

このとき、エージェントの平均移動距離は、 $\langle d \rangle = 5.0$ となる。

2.2 Levy Flight モデル

2.1 節の Random Walk モデルにおいて、次の地点までの移動距離はべき分布に従うものとする。すなわちエージェントの移動距離 d は、次のような確率密度関数に従うとする。

$$P(d) \propto d^{-\lambda} \quad (1)$$

ここで、 λ はべき指数で、 $1 < \lambda < 3$ とする。一般に、べき指数が $\lambda > 3$ のときは、通常の Random Walk モデルになることが知られている[7]。また、両モデルを比較するため、Random Walk と Levy Flight に基づく平均移動距離は等しく $\langle d \rangle = 5.0$ となるようにする。

3. シミュレーションの設定

3.1 エージェントの行動ルール

エージェントは、 500×500 の正方形の領域内を2節で述べた Random Walk 及び Levy Flight に従って移動する。ただし、移動している間は目標を捜索できないものとする。また、探索領域の境界条件は、ビリヤードのような射壁とする。

3.2 目標の設定

1つの目標は、領域に占める割合が1%と小さなサイズの正方形の目標とし、エージェントが移動する領域内に配置する。配置方法は、まず固定目標として配置し、次に移動目標として配置した。

3.2.1 固定目標の配置

まず、目標を固定目標とし、Fig1(a),(b)に示すように領域の中央、領域の左上端に配置する。また、目標数を増やし、Fig1(c),(d)に示すように領域内に多数の目標を均等に配置する。

3.2.2 移動目標の設定

Fig.1(a)の目標を移動目標とし、その目標の移動方法

は Random Walk または Levy Flight に基づくとした。
 Levy Flight に基づく目標の移動は 1.2 節で述べた方法
 と同じとした。

$$\alpha = 1 + \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln \frac{x_i}{x_{min}}} \quad (2)$$

ここで、 n はデータ数、 x_{min} は最小値、 x_i は i 番目のデ
 ータの値を表す。この式を使用して、べき指数を求め
 ると、Fig.2 中に示す数値が求まり、その値をもとに近
 似直線を引くと概ね直線状にあることがわかる。

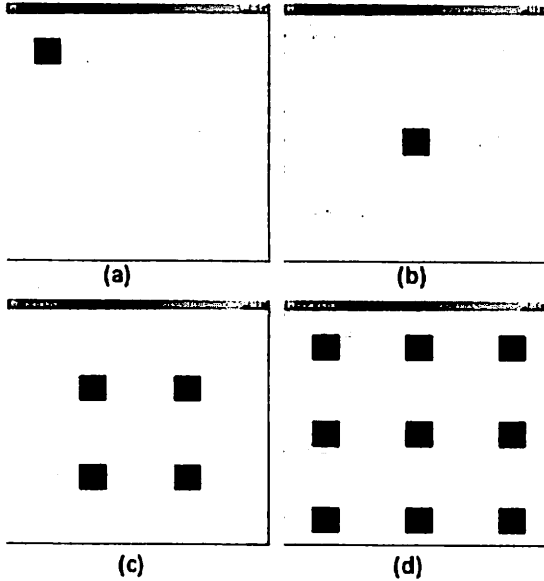


Fig 1 : 目標の配置方法 :(a)左上端(b)中央(c)4点(d)9点

4. シミュレーション結果

本研究は、Random Walk に基づく探索法と Levy Flight に基づく探索法の探索効率を定量的に比較し、
 効率的な探索方法及び移動距離と移動時間の関係を明らかにすることを目的とする。まず、固定目標に対す
 るシミュレーションを行い、次に移動目標について、それぞれ、目標に到達するまでの STEP 数を比較する。

4.1 固定目標

Fig.2 は、Random Walk と Levy Flight に基づく探索
 を 1000 回繰り返して、目標への到達 STEP 数の分布関数
 を示したものである。また、Table.1 は到達 STEP 数の
 平均値を示したものである。これらの結果から目標が
 稀少な場合には、Random Walk より Levy Flight による
 探索法がはるかに効率が良いことがわかる。しかし、
 目標数を増加し、目標の密度が高くなるにつれて、両
 方のモデルは差がなくなり、探索効率性に差はほとん
 どないことがわかる。

また、Fig.2 において Levy Flight の STEP 数の分布が
 べき分布に従っていると仮定すると、べき指数 α は最
 尤推定により次式によって推定することができる[8]。

Table 1 : 目標までの平均 STEP 数

目標領域:1%目標端点		目標領域:1%目標中心	
RandomWalk	Levy Flight	RandomWalk	Levy Flight
18163	5344	7576	2698
目標領域:1%目標4点		目標領域:目標1%9点	
RandomWalk	Levy Flight	RandomWalk	Levy Flight
1433	384	921	121
目標領域:1%目標25点		目標領域:1%目標36点	
RandomWalk	Levy Flight	RandomWalk	Levy Flight
65	42	18	15
目標領域:1%目標64点		目標領域:1%目標81点	
RandomWalk	Levy Flight	RandomWalk	Levy Flight
2.9	2.5	0.5	0.6

4.2 Levy Flight のべき指数と探索効率の関係

(1)式の Levy Flight のべき指数 $\langle \lambda \rangle$ の違いによる探索
 効率への影響を調べるために、Levy Flight のべき指数
 を $\langle \lambda \rangle = 1.2 \sim 3.2$ の間で変化させた。また、目標の配置
 方法は、Fig.1(b)と同じ領域の中央とし、大きさは探索
 領域の 0.05%~1.0%の間で変化させた。それぞれのべ
 き指数において Levy Flight に基づく探索を 1000 回繰
 り返し、探索目標の大きさと目標までの平均到達 STEP
 数の関係及び、目標到達までの平均移動距離との関係
 を調べた。その結果を Fig.4(a),(b)に示す。

Fig.4(a)より、STEP 数でみると目標の大きさに関係
 なく、 $\langle \lambda \rangle = 1.2$ のときが最も STEP 数が少なく、べき
 指数が小さいほど、少ない STEP 数で探索目標に到達
 できていることがわかる。一方で、Fig.4(b)より、目標
 到達までの平均移動距離で見ると、探索目標が探索
 領域に対して小さくなればなるほど、 $\langle \lambda \rangle = 2$ の時に
 最も優れた探索効率を示した。また、平均 STEP 数及
 び平均移動距離のどちらでも共通して、 $\langle \lambda \rangle = 3.2$ のと
 き、すなわち Random Walk に基づく探索方法のような
 振る舞いをするときの探索率は、他のべき指数と比較
 してみても、全般的に良くなかった。

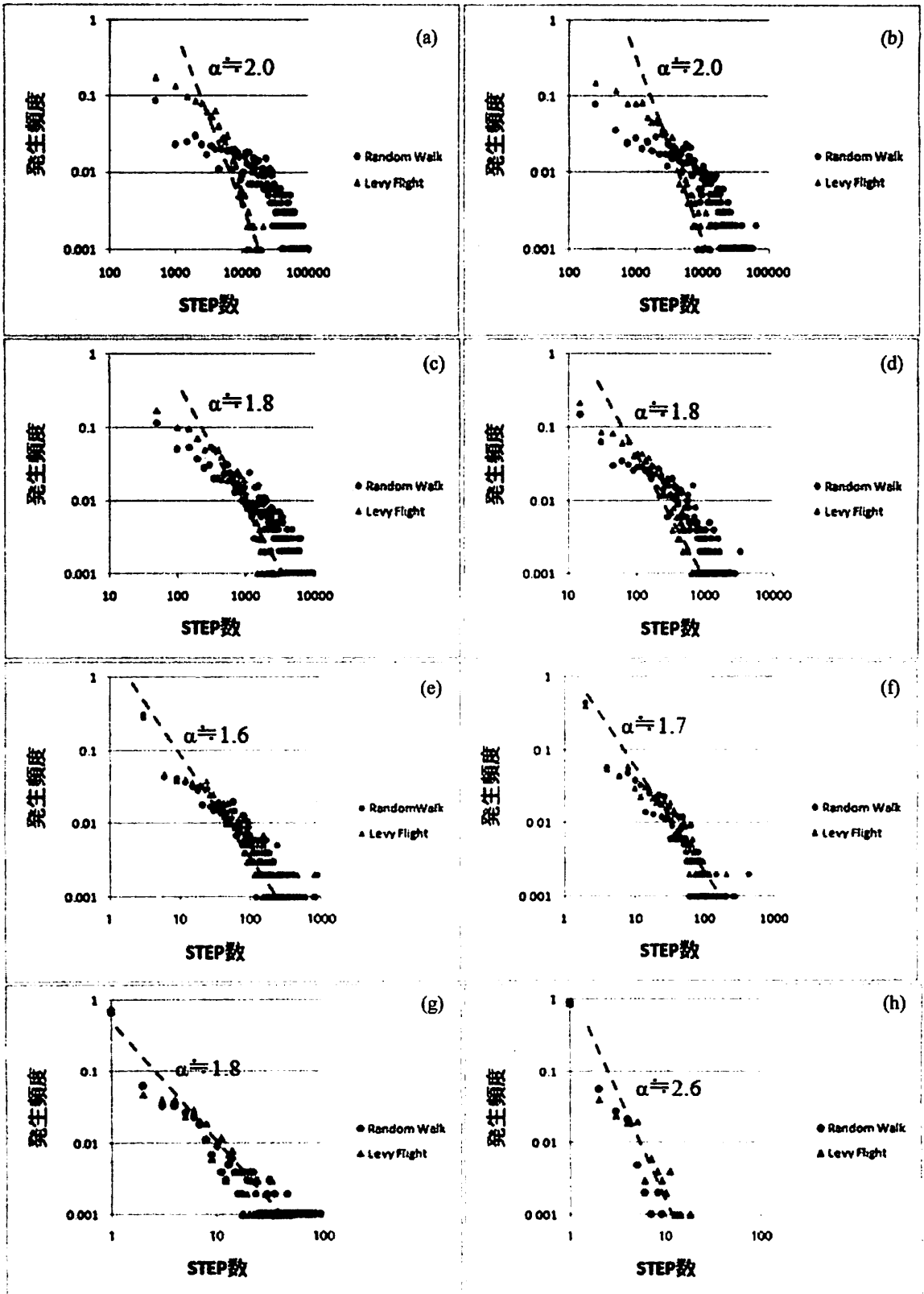


Fig 2 : 目標の配置方法:(a)左上端(b)中央(c)4点(d)9点(e)25点(f)36点(g)64点(h)81点

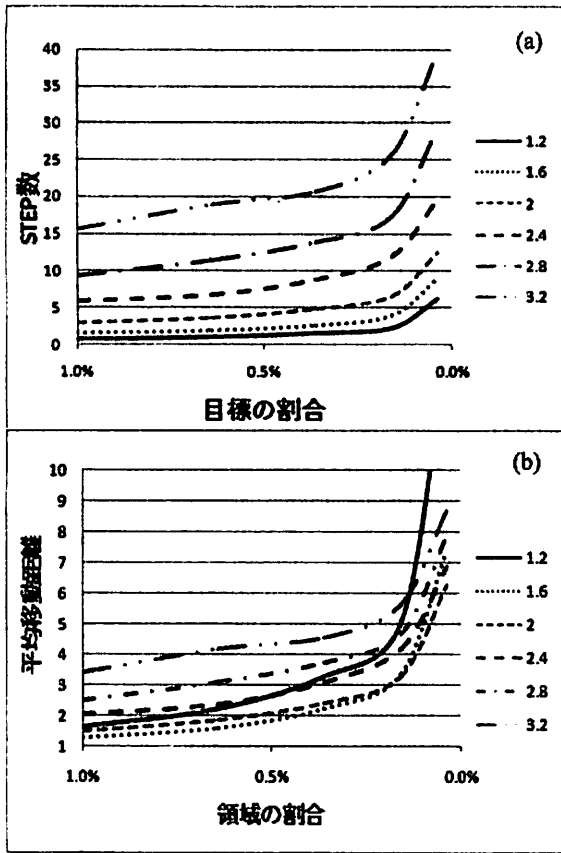


Fig 3: べき指数を変化させたときの目標密度と探索効率の関係: (a)STEP 数 (b)平均移動距離

4.3 移動目標

次に、探索領域に対し 1% の大きさの目標が Random Walk と Levy Flight に基づいて移動するとき、Random Walk と Levy Flight による探索法を比較する。その結果を Table.2 に示す。Fig.4 は分布を示したものである。

Table 2: 目標までの平均 STEP 数

目標	RandomWalk	
エージェント	RandomWalk	Levy Flight
平均	STEP 数	STEP 数
	6146	1881
目標	Levy Flight	
エージェント	RandomWalk	Levy Flight
平均	STEP 数	STEP 数
	1897	1169

この結果から、移動目標の場合も、Random Walk よりも Levy Flight の方が効率性が高いことがわかる。また、目標が Levy Flight で移動している場合において、Random Walk で移動しているときほど、目標への到達 STEP 数に差が表れなかったのは、目標自身がエージェントの存在している場所へ移動してくる場合が多く存在するためだと考えられる。また、Fig.4(a)において Random Walk 探索法及び Levy Flight 探索法の分布がべき分布に従うと仮定すると、(2)式により、べき指数 α は Fig.4(a)中に示すようになる。

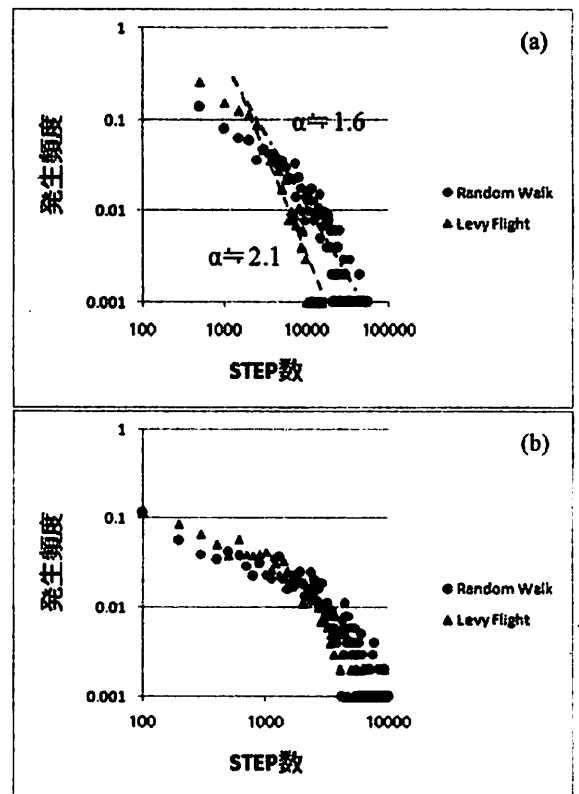


Fig 4: 到達 STEP 数の分布: 目標の移動方法は、それぞれ(a)Random Walk (b)Levy Flight

5. 各探索法の比較

4.1 節における目標が 1 つの場合と 4.2 節を比較すると、目標の大きさが同じであっても、<目標, エージェント>の組み合わせで見ると、<Levy Flight, Levy Flight>の組み合わせが最も効率が良い、一方で、<固定目標, Random Walk>の組み合わせが最も探索効率が悪い結果となった。被探索者と探索者の関係でみれ

ば、被探索者側の立場では、相手の移動方法によらずその場でじっとしていた方が発見されにくい。一方で探索者の立場からすれば、Random Walkで探索するより、Levy Flightで移動したほうが早く発見できることを意味している。

一方で、お互いに相手を探索しているようなときには（ランデブーという）、お互いにLevy Flightで探索したほうが早く出会える可能性が高いといえる。

6. 今後の課題

Random WalkとLevy Flightの探知効率をシミュレーションによって比較研究を実施した。はじめに、目標を固定目標とし、基礎的な問題を設定した。領域の1%の目標を、領域左上端、中央に配置し、エージェントにRandom Walk及びLevy Flightを行わせることによってシミュレーションを行い、探索効率を比較した。その後、目標数を徐々に増やし、両者の探索効率に変化が現れるかをしらべた。次にLevy Flightのべき指数を変化させ、べき指数の影響について調べた。さらに、目標を移動目標として、両者の探索効率を比較し、固定目標の場合と違いが現れるかを調べた。か存在しないときには、Levy Flight探索法の探索効率の方が、Random Walkのそれよりもはるかに優れていた。しかしながら、目標が増加し、探索領域に占める割合が多くなるにつれて、両者の差は小さくなり、6割を越えた時点で両モデルに差は見られなくなった。また、べき指数の影響に関しては、目標が小さいほどべき指数が2の時がもっとも効率がよかった。さらに、目標までの平均STEP数の分布がべき分布になっていたことも注目すべき結果であると考えられる。これについて理由も含めて今後さらに検討していきたいと考える。一方で、移動目標のモデルにおいては、目標、エージェントともにLevy Flightで移動する場合に最も探索効率がいいことが示された。

しかし、今回は比較的基礎データの検討が主目的であったため、今後の課題としては、エージェントの移動モデルを考える際に、移動した場所における滞在時間をべき分布で与え、滞在時間と探索距離の両方を考慮にいれて、滞在時間と探索距離の関係について検討していきたいと考えている。

- [1]Frederic Bartumeus, M. G. E. da Luz, G. M. Viswanathan, Catalan J: Animal search strategies: a quantitative random-walk analysis. *Ecology* 86 : 3078-3087 (2005)
- [2]G. M. Viswanathan, Sergey V. Buldyrev: Optimizing the success of Random searches. *NATURE* 401 911-914 (1999).
- [3]G. M. Viswanathan, Sergey V. Buldyrev: Levy Flight search patterns of wandering albatrosses. *NATURE* 381 413-415 (1996).
- [4]B.J.Cole:Fractal time in animal behavior : The movement activity of Drosophila. *Animal Behaviour* 50 1317 (1995).
- [5]Goldhirsch, I and Gefen, Y. :Biased random Walk on networks. *Phys.Rev, A*, 35 1317 1987
- [6]Costa, L- F and Sporns, O. Structured thalamocortical connectivity revealed by random walks on complex networks. [arXiv.org:q-bio, 0602021](https://arxiv.org/abs/q-bio/0602021), 2006.
- [7]S. V. Buldyrev, A. L. Goldberger, S. Havlin, C. K. Peng, M. Simons, H. E. Stanley: Generalized Levy-walk model for DNA nucleotide sequences. *Phys. Rev. E.* 47 4514 1993.
- [8]Aaron Clauset, Cosma Rohilla Shalizi, M.E.J. Newman: Power-law distributions in empirical data. [arXiv, 0706.1062v1](https://arxiv.org/abs/0706.1062v1) physics, data-an 2007.