

画像処理による根長計測
(Measurement of root length by using image processing)

九州大学 生物環境調節センター
筑紫二郎

1. はじめに

植物根の吸水機能は土壌の透水性と根長によって関係付けられている。line intersect法はNewmanによって開発された根長計測法で、これまで種々の装置を用いて改良されてきた。それは、一種の統計的な方法に基づいていて、今日ほとんどの根長計測器に採用され、種々の分野で使用されている。画像処理の技術を応用した計測法もいくつか報告されているが、原理はやはりline intersect法に基づいている。ここでは、画像処理に基づいて従来のline intersect法とは異なる方法を開発し、その精度の検討をおこない、キュウリの根の生長計測に対する適用を試みた。

2. 方法

画像処理システム

根の試料として、水耕で育てたキュウリの根を用いた。根は、絡んだり、重なり合った部分がないように水中でほぐした。さらに、黒い布を張った板に根を広げてコントラストをつけた。CCD内臓のステルビデオカメラ(RC-474, Canon)で試料の画像を撮影した。画像データは一旦フロッピディスクにセーブされ、ビデオレコーダを通して画像処理のプロセッサ(ED-1382, Edec)に入力される。画像は、512x480画素からなり、RGBの3つのモードで、それぞれ0-255のグレードでカラー表示される。入力された画像は、根の部分を抽出するために、フィルターを通して2値化した。2値画像では、根はいくつかの画素の幅を持って表示されるが、さらに細線化処理を施すことによって根の中心を通る1つの画素幅の線に変換される(図1)。この細線画像から根長を計算した。なお、1つの画素幅は、画像上のスケールの間隔から計算した。

根長計算

個々の画素は正方形をしているため、画素の水平または垂直方向と対角線方向との長さの比は $1:\sqrt{2}$ である。線の長さを、画素数と1つの画素幅との積で計算すると、同じ画素数からなる直線でも、水平または垂直の直線の場合と、それらと45度の角度をなす直線の場合とでは、およそ30%もの誤差が生じることになる(図2)。従って、細線画像から根長計算する際、このような誤差を考慮して画素の接合数を用いることにした。つまり、根長は次式で計算できる。

$$R = (H + \alpha D) P \quad (1)$$

ここで、Rは根長、H、D、はそれぞれ細線画像における水平または垂直方向および対角方向の画素の接合数、Pは1つの画素幅、 α は対角方向の接合に対する長さの補正係数である。直感的には α は $\sqrt{2}$ である。しかし、この α の値で計算すると、ほとんどの場合過大評価になる。図2に種々の直線を示す。nを水平または垂直方向に連なる画素数とする。

直線は同じ画素数で出来ているが、 n によって長さが異なる。 $n=1$ の場合、当然 $\alpha = \sqrt{2}$ である。 $n=2$ のとき、その直線の一部を取り出すと、1つの対角接合と1つの水平接合から成立っている(図3)。(1)式において $\alpha = \sqrt{2}$ とした場合、計算される長さは、図の破線に相当し、この画素配置を直線とみなした実線より長くなる。過剰な長さの集積は全体的な過大評価につながる。そこで、(1)式の計算値が実線に相当するように α 値を調節する。一般的な n の値に対して $\alpha(n)$ は

$$\alpha(n) = \sqrt{n^2 + 1} - (n-1) \quad (2)$$

となる。細線画像において、いろいろな個数の画素が水平または垂直に連らなっている。 n 個の画素で接合しているタイプの数 $M(n)$ とする。 α 値はタイプによってそれぞれ異なっているので、 $\alpha(n)$ に $M(n)$ で重み付けることによって平均値 $\bar{\alpha}$ を求める。

$$\bar{\alpha} = \Sigma (\alpha(n)M(n)) / \Sigma M(n) \quad (3)$$

この $\bar{\alpha}$ 値は、(1)式の α に代入して用いられる。

3. 結果および考察

測定精度を検証するために、既知の木綿糸の長さを測定した。表1は(1)式における α 値の採り方による測定誤差の比較をおこなったものである。 $\alpha = \sqrt{2}$ のとき、種々の長さの測定に対して大体3-5%の過大評価になっていることが分かる。一方、 $\alpha = \bar{\alpha}$ のとき、誤差が小さく、2%以下である。 $\alpha = \bar{\alpha}$ を用いた推定長さと実際の長さとの比較を図4に示す。プロットした点はほとんど1:1線上に載り、その相関係数は0.9999($P < 0.01$)であった。表

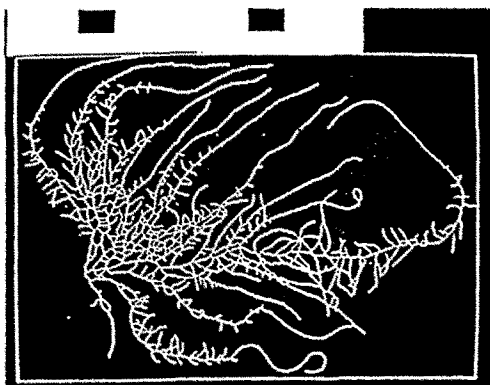


図1 根の細線画像。

2は、同じ長さの糸に対して5回ずつ異なる方向で測定し、その結果を統計処理したものである。平均値は実際の値とほぼ等しく、標準偏差、変動係数は共に極めて小さかった。これらのことは、本測定法の精度と再現性を保証するものである。

実際のキュウリの根の生長計測に本法を適用した結果を図5に示す。根系の根長は植物の根の乾燥重および葉面積とともに経時的に指数的に増加した。

本根長計測法には2つの利点がある。1つは測定される根の配置のランダム性や方向性に影響されないことであり、他の1つは測定には特殊な装置が必要でなく、市販の画像処理装置を用いて行うことができることである。

以上のことから、本計測法の有用性が認められる。

表1 根長計算における α の影響。

Actual length (R) (cm)	α	Estimate (E1) by $\alpha = \sqrt{2}$ (cm)	$ R-E1 /R$ (%)	Estimate (E2) by $\alpha = \bar{\alpha}$ (cm)	$ R-E2 /R$ (%)
40.2	1.273	42.15	4.85	40.02	0.45
49.4	1.314	51.48	4.21	49.13	0.75
63.9	1.293	66.92	4.72	63.85	0.07
92.2	1.271	95.85	3.95	91.12	1.17
100.7	1.308	104.99	4.26	100.52	0.18
151.6	1.257	156.81	3.43	149.16	1.61
199.7	1.280	209.94	5.12	199.33	0.19

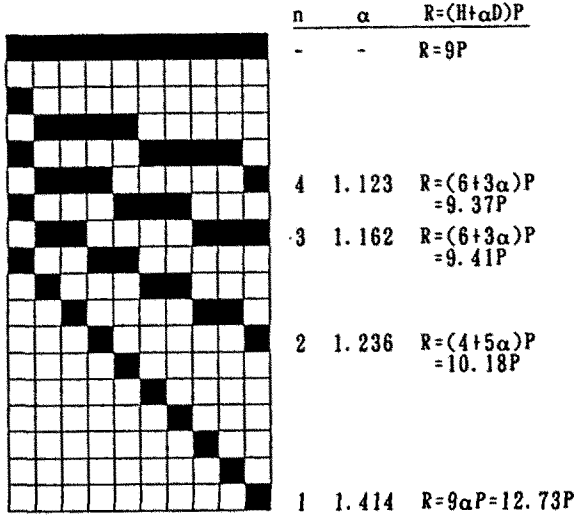


図2 画像における種々の直線と長さの計算。

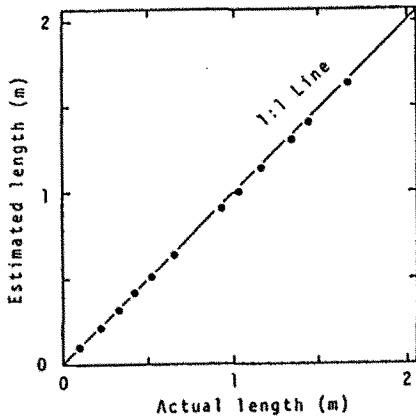


図4 測定値と実測値との比較。

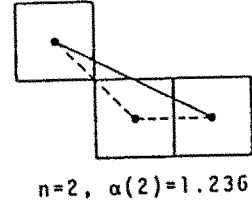


図3 n=2の場合の画素配置。

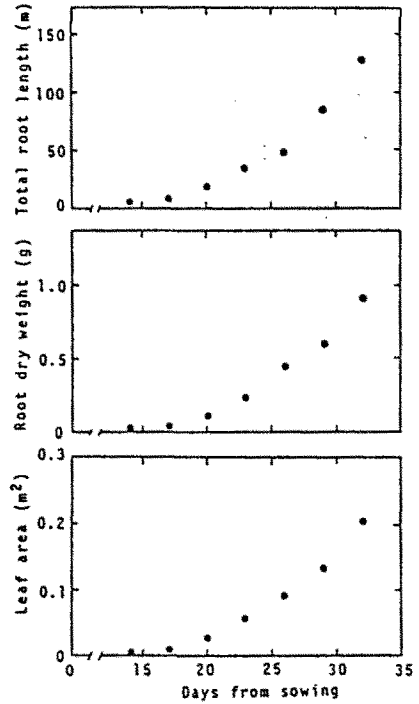


図5 根長、根の乾燥重、及び葉面積の生長。

表2 根長計測の精度

Actual length (cm)	Estimated length (cm)	Standard deviation (cm)	Coefficient of variation (%)
49.4	49.31	0.65	1.31
100.7	100.81	0.37	0.36
151.6	150.20	1.31	0.87
199.7	198.18	0.83	0.42