

研究速報

ファジー推論による最大成長速度時の推定

一関 紀子[†](学生員)牛山 幸彦^{††}杉本 英夫^{††}木竜 徹[†](正員)

Estimation of Peak Height Velocity Age (PHVA) Using Fuzzy Logic

Noriko ICHINOSEKI[†], Student Member,Yukihiko USHIYAMA^{††}, Hideo SUGIMOTO^{††}, Nonmembers,
and Tohru KIRYU[†], Member[†]新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市

Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Niigata-shi, 950-2181 Japan

^{††}新潟大学教育人間科学部, 新潟市

Faculty of Education and Human Sciences, Niigata University, Niigata-shi, 950-2181 Japan

あらまし 成長段階は個人差が大きく、年齢や学年では把握しきれない。更に従来の骨年齢を用いた成長段階の推定法は煩雑であり、実際に用いるのは困難である。そこで本論文では、個人差へ対応するためにファジー推論を用い、測定が容易な身長を指標として個人の成長段階を推定する方法を提案する。その結果、平均 3.87 か月の誤差で最大成長速度時を推定することができた。

キーワード ファジー推論, 成長速度曲線, 最大成長速度時

1. まえがき

近年、子どもの運動不足が問題となる一方で、早すぎるスポーツの専門化が様々な障害を引き起こしている [1]。代表的な発育期のスポーツ障害である Osgood-Schlatter 症は、身長の成長速度が最大となる時期に発症することが多いと報告されていることから [2]、指導者は、子どもの成長段階を把握し、適切なトレーニング計画を立てることが強く求められる。実際にスポーツ現場や医療現場などでは、個人ごとの成長段階を把握する必要があり、個人ごとにデータを収集し、成長段階を推定するのが望ましいと考えられる。

成長に対する縦断的な研究は古くからなされており [3]、現在、成長段階をとらえるには、骨年齢を用いる [4] のが一般的である。しかしこの方法は経験を積んだ医師がレントゲン設備を用いて行うものであり、実際の場面で用いるのは困難である。一方、身長は測定が容易であり、日内変動などの誤差はあるが、成長段階の目安としては十分であると考えられる。

以上のことから本論文では、発育期の初期の段階

で、身長をもとに最大成長速度時（身長の成長速度が最大となる時点；peak height velocity age: PHVA）をファジー推論により推定する方法を提案する。ファジー推論は複雑で非線形なシステムを取り扱うのに適しており [5]、個人差を取り扱うには有効な方法であると考えられる。

2. 方法

新潟県内の高等学校 2 校の男子生徒 512 名を対象に、身体測定結果の追跡調査を行い、1 校は小学校 1 年生から高校 2 年生まで、他の 1 校は高校 3 年生までの身長の縦断的測定値、及び生月を得た。

2.1 成長速度曲線

身長の資料は年に 1 回の測定結果である。この測定頻度では、成長の著しい時期の変化はとらえきれない。このような不等間隔の測定値から成長曲線を求める方法として、最近では Wavelet 近似が試みられてきている [6], [7]。ここでは、従来行われてきている 3 次スプライン補間法を用い、月ごとの身長のデータを描画することにより、等間隔 Δt の distance curve (成長曲線) を得た。

算出された成長曲線 $\{x_k\}$ は解析的に微分可能な関数として表現できないため、数値微分を施して成長速度 $\{\dot{x}_k\}$ を得た。実際には、身長の測定値には多少の測定誤差が含まれていると考えられるため、連続する 5 点のデータ点を 2 次式に近似して平滑化したのち 1 回微分する 5 点荷重移動平均法 [8] を用いた。すなわち、 k 月における成長速度 $\{\dot{x}_k\}$ は、以下のように表される。

$$\dot{x}_k = \frac{-2x_{k-2} - x_{k-1} + x_{k+1} + 2x_{k+2}}{10 \cdot \Delta t} \quad (1)$$

ただし、 n 月までの成長速度のうち、実際に得られる $\{\dot{x}_k\}$ は $3 \leq k \leq n-2$ である。以上のようにして算出された成長速度のデータを描画し、height growth velocity curve (成長速度曲線) を得た (図 1)。成長速度曲線は、図 2 のように区分できることが知られている [9]。関口らによると、Phase II は、期間の長さによっていくつかのパターンに分けることができる [2]。

成長速度曲線は個人によって様々なパターンを示すが、波形に注目すると、大まかに単峰性 (実線) と双峰性 (破線) に分けることができる。双峰性のはじめのピークは mid-growth spurt と呼ばれ、思春期成長加速現象 (adolescent growth spurt) の開始年齢 (take-off age: TA) 以前に現れるスパート現象であ

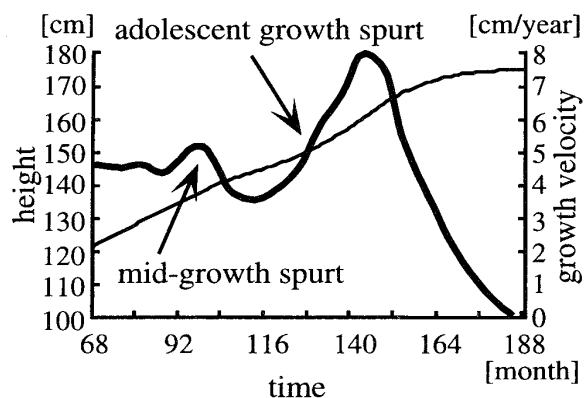


図1 成長曲線と成長速度曲線の例
Fig. 1 Typical individual distance curve (thin line) and height growth velocity curve (thick line).

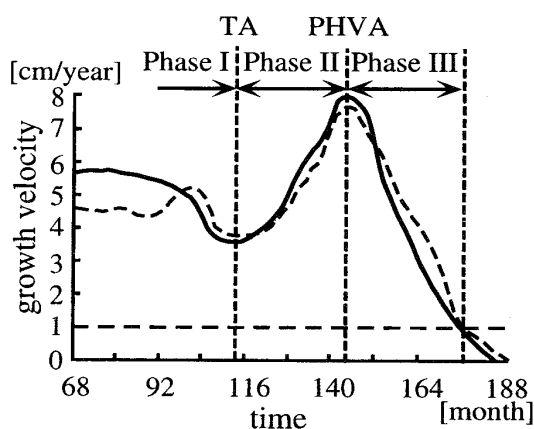


図2 成長速度曲線の区分
Fig. 2 Segments of height velocity curve.

る。原因として副腎皮質系ホルモンの関連などの指摘 [10] もあるが、その因果関係は明らかにされておらず、開始年齢やピークの高さ、数についてははっきりしていない。本研究で得た成長速度曲線の中にも、mid-growth spurt なのか、それとも細かい変動なのか判断つきかねるものがあり、TA を決定できないものが多数見られた。そこで、本研究では双峰性のものを排除し、TA が確実に判定できる単峰性のもののみについて検討を加えることとした。ここでは、月齢が 111.93 ± 11.22 か月に含まれ、そのときの身長が 138.28 ± 6.54 cm、成長速度が 3.83 ± 0.69 cm/year となる成長速度曲線の極小点を TA と定めた。

以上のようにして抽出したデータのうち、高校2、または3年次で成長がほぼ終了したと思われるもの(成長速度が 1 cm/year 未満になるもの) 232 名を抽出し、分析対象とした(表 1)。更に、分析対象について、Phase II の長さ (P_{II}) のヒストグラムを作成

表 1 分析対象の特徴

Table 1 Means and standard deviations of age, height, and height growth velocity at take-off age and age at peak height velocity.

	items	mean \pm s.d.	range
take-off	age	122.38 ± 11.05	99-158
	velocity	3.78 ± 0.64	2.03-6.27
	height	137.25 ± 6.18	122.25-155.94
peak	age	151.32 ± 9.85	129-182
	velocity	8.63 ± 1.03	6.47-11.62
	height	154.02 ± 5.36	140.15-169.29

[a.u.]

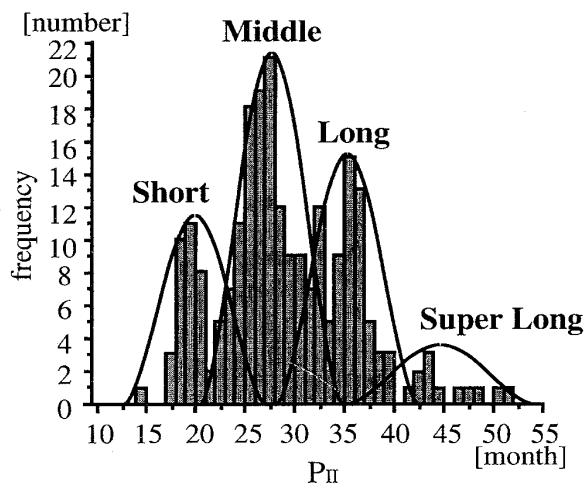


図3 Phase II の長さ (P_{II}) のヒストグラム
Fig. 3 Histogram of the term of Phase II.

し、Short, Middle, Long, Super-Long の四つの型に分類した(図 3)。

3. ファジー推論による PHVA の推定

様々な要因が複雑に絡み合う人間の成長を表現するために、ファジー推論は適しているものと考えられる。本研究では、ファジー推論で多く用いられる Mamdani の推論法 [11] を用いて P_{II} の推定値 (\hat{P}_{II}) を得た。

本研究では、TA は既にわかっているものとする。その結果、TA に \hat{P}_{II} を加算することで、最大成長速度時 (PHVA) を推定することが可能となる。なお、障害予防の観点から、少なくとも TA の 6 か月後には PHVA を把握することが望ましい。ここでは、 P_{II} が最も短いものが 14 か月であったため、推定には TA から 6 か月後までのデータを用いることとした。

3.1 ファジールール

推論で使用するファジールールは、if (前件部) then (後件部) 型で表される。本研究では、図 3 に基づいて分類した四つの型に、Short-Middle と Middle-Long

表2 ファジールール

Table 2 Fuzzy rules. TA : take-off age; SH : height of take-off age after 6 months; SV : velocity of take-off age after 6 months; TSH : height differential between take-off age after 6 months; TSV : velocity differential between take-off age and after 6 months.

rules	TA	SH	SV	TSH	TSV	type
1	late	high	-	-	-	Short
2	late	-	fast	-	-	Short-Middle
3	late	-	-	small	-	Middle
4	early	-	-	small	-	Middle-Long
5	early	-	-	-	small	Long
6	early	low	-	-	-	Super-Long

の二つの型を加えた合計六つの型の、身長、月齢、速度との関係からファジールールを作成した(表2)。ここでは、パラメータごとに六つの型に対して Kruskal-Wallis test [12] ($p < 0.05$) を行い、型ごとに独立性の高い二つのパラメータを選択して前件部のパラメータとした(表2)。

3.2 メンバシップ関数の設計

前件部のメンバシップ関数にはシグモイド関数[13]を用いた。シグモイド関数は、実数を全体集合とする場合のファジー集合であり、ファジー集合Cのメンバシップ関数 $S_c(z; a, b)$ は以下のように定義される。なお、 a, b は実数である。

$$S_c(z; a, b) = \begin{cases} 0 & (z < a \text{ のとき}) \\ 2 \left(\frac{z-a}{b-a} \right)^2 & (a \leq z < \frac{a+b}{2} \text{ のとき}) \\ 1 - 2 \left(\frac{z-b}{b-a} \right)^2 & (\frac{a+b}{2} \leq z < b \text{ のとき}) \\ 1 & (z \geq b \text{ のとき}) \end{cases} \quad (2)$$

本研究では、ファジールールで使用するパラメータを take-off age (TA), take-off age の6か月後身長 (SH), take-off age の6か月後成長速度 (SV), take-off age と6か月後の身長差 (TSH), take-off age と6か月後の成長速度の差 (TSV) とした。これらのパラメータに対し、型ごとに平均値 μ と標準偏差 σ を求め、 $\mu - \sigma = a$, $\mu + \sigma = b$ とした。

後件部のメンバシップ関数には P_{II} のヒストグラムに基づき、三角関数を用いた。 x_1, x_2 ($x_1 < x_2$) は、 $F(x) = 0$ のときの座標である。

$$F(x) = \frac{1}{2} \cos \left\{ \left(\frac{2}{x_2 - x_1} \right) \left(x - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) \right\} + \frac{1}{2} \quad (3)$$

表3 推定結果

Table 3 Results of estimated value and error between detected value and estimated value.

items	P_{II}	\hat{P}_{II}
mean	28.66	30.23
s.d.	6.86	6.91
min.	14.00	13.56
max.	52.00	46.33

[month]

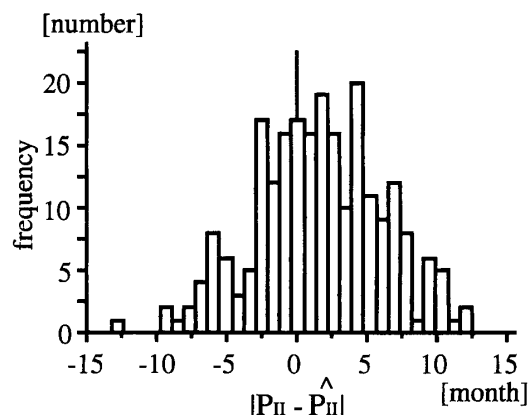


図4 個人ごとの誤差 $|P_{II} - \hat{P}_{II}|$ のヒストグラム
Fig. 4 Histogram of the error $|P_{II} - \hat{P}_{II}|$.

以上のように定めたメンバシップ関数を用いてファジー推論を行った。

4. 推定結果

作成した推定プログラムに分析対象データを入力して Phase II の長さの推定結果を得た。 P_{II} が 28.66 ± 6.86 か月であるのに対し、 \hat{P}_{II} は 30.23 ± 6.91 か月であった(表3)。

5. 考察

Student t -test を行った結果、表3にある P_{II} と \hat{P}_{II} の平均値に統計的有意差は認められなかった。しかし、改めて各々のサンプルごとの誤差 $|P_{II} - \hat{P}_{II}|$ のヒストグラム(図4)を見ると、 $|P_{II} - \hat{P}_{II}|$ の平均値は3.87か月(P_{II} の13.5%相当)となる。ただし、 $|P_{II} - \hat{P}_{II}|$ が -2.5 か月から5か月の間で一様に頻度が高く、その中でもいくつかのピークが認められる。このピークが何に起因するものなのかは今後の検討課題である。

図5を見ると、 P_{II} が40か月以上のものは \hat{P}_{II} が低目に推定されていることがわかる。これは、Long 及び Super-Long を表すファジールール (rules # 5, # 6) に改善が必要であることを示している。また、現在のファジールール及びメンバシップ関数の設計には、経験的な要素が多分に含まれており、これらの設

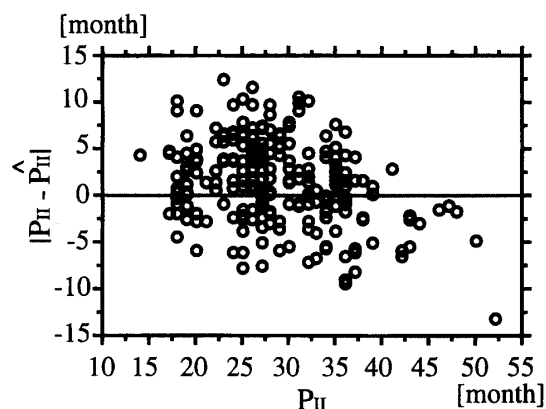


図5 推定誤差散布図

Fig. 5 Scattergraph of the error between P_{II} and \hat{P}_{II} .

計にはニューラルネットワークなどを導入するなどの自動化が適しているだろう。

また、使用しているデータには測定誤差が多分に含まれていることが予想される。本研究で使用した身長測定値にも、測定誤差と思われるものがいくつか認められた。身長測定値には、測定法や日内変動、及び姿勢などが大きく影響することから、正確に身長を測定する簡便な方法が求められる。

更に、測定頻度についても検討が必要である。本研究では身長の測定値は年ごとのものを使用しているが、身長測定頻度を上げることにより推定精度の向上が予想される。しかし、使用の際の手間を考慮し、推定精度を向上させなおかつあまり手間のかからない測定頻度を模索する必要がある。

6. む す び

年ごとの身長測定値及び生月から、ファジー推論を用いて Phase II の長さを推定した。その結果、思春期成長加速現象の開始年齢から6か月後の時点で、発育段階を3.87か月の誤差（Phase II の長さの13.5%相当）で推定することが可能となった。このような方法を用いて最大成長速度時を推定し、更に、障害発生の危険率が高いと思われる Phase II の期間に身長測定頻度を高めることによって、個人の成長段階にあった適切な練習計画の立案が可能になるものと考えられる。

本研究で作成した、最大成長速度時推定法の作成・

使用には、多分に経験的な要素が含まれている。今後は、成長曲線の補間法の検討、思春期成長加速現象の開始年齢の自動判別やファジールールの自動設計が必要である。また、実際に使用するためには使いやすいユーザインタフェースも求められる。今後はこれらの問題に対する検討を行う予定である。

謝辞 本研究を進めるにあたり、新潟こばり病院の古賀良生先生、三条総合病院の関口秀隆先生に御指導頂きました。ここに感謝致します。

文 献

- [1] 武藤芳照, 子どもとスポーツ, 東京大学出版会, 1989.
- [2] 関口秀隆, 古賀良生, 牛山幸彦, 杉本英夫, 川崎美和子, 与口暁子, “至適運動強度設定の指標としての身長の変化についての検討,” 日本整形外科スポーツ医学会誌, vol.12, pp.513-515, 1993.
- [3] J.M. Tanner, R.H. Whitehouse, and M. Takaishi, “Standard from birth to maturity for height, weight, height velocity and weight velocity: British children 1965,” Archives of Disease in Childhood, vol.51, pp.170-179, 1976.
- [4] J.M. Tanner, R.H. Whitehouse, N. Cameron, W.A. Marshall, M.J.R. Healy, and H. Goldstein, Assessment of Skeletal Maturity and Prediction of Adult Height (TW2 Method) Second Edition, Academic Press, 1983.
- [5] 萩原将文, ニューロ・ファジー・遺伝的アルゴリズム, pp.7-9, 産業図書, 1994.
- [6] 藤井勝紀, 山本 浩, “身長成熟別発育速度曲線の解析,” 体力科学, vol.44, pp.431-438, 1995.
- [7] 三澤哲也, 森 隆一, “Simulated Annealingによる時系列データのWavelet近似,” 統計数理学研究所共同研究リポート 理工学分野での不規則現象の数理的解析—理論と応用, vol.114, pp.30-39, 1998.
- [8] 体育科教育研究会編, 体育学実験・演習概説, pp.132-133, 大修館書店, 1979.
- [9] 村田光範, “子供にとってスポーツとは何か,” 臨床スポーツ医学, vol.8, no.11, pp.1231-1235, 1991.
- [10] J.M. Tanner and N. Cameron, “Investigation of the mid-growth spurt in height, weight and limb circumferences in single-year velocity data from the London 1996-67 growth survey,” Annals of Human Biology, vol.9, pp.425-440, 1982.
- [11] 菅野道夫, ファジー制御, pp.76-84, 日刊工業新聞社, 1988.
- [12] 市原清志, バイオサイエンスの統計学, pp.158-168, 南江堂, 1996.
- [13] 向殿政男, ファジイのはなし, p.31, 日刊工業新聞社, 1989. (平成11年1月4日受付, 6月8日再受付)