

日常環境における動的物体を反映した自律移動ロボットのための 環境地図構築

Building a Map including Moving Objects for Mobile Robot Navigation in Living Environments

精密工学専攻 43号 廣井翔

Syo Hiroi

1. はじめに

今日に至るまで、ロボットの多くは加工・組み立て工場や災害現場、人の立ち入れない場所などといった特殊環境で活動するものが主であった。しかし近年では、科学技術の発展によってロボットに対して人と共存し支援する新たな役割が求められている。人と共存・支援するロボットの応用場所として看護・介護現場や公共施設⁽¹⁾⁽²⁾、オフィスや家庭といった生活空間⁽³⁾⁽⁴⁾などが検討されている。人支援のためのロボットには、人が存在する環境に合わせた適切な行動を実現することが求められる。移動について考えると、逐一外部からの制御を必要とせずロボット自身の判断によって目的地に移動をする機能、つまり自律移動機能は多様な環境に対して柔軟な活動をするための基本的な機能であるといえる。そのため現在では、ロボットが人の生活する非整備環境において自律移動を行うための様々な手法が提案されている。

自律移動機能を実現する要素技術の一つである環境地図構築に着目してみると、環境地図はロボットが実際にどのように移動するかを決定する経路設計・障害物回避を行う際に利用される情報である。したがって、人が活動する日常空間における環境地図には、日常環境に適した効率的で安全なナビゲーションを行うため、移動物体が存在する動的な環境をいかに地図として表現するかということが課題として挙げられる。

従来の環境地図構築手法にも人と共存する環境での自律移動を実現するために動的な物体の存在を考慮した試みがある。先行研究の一つに、動物体により掃引された領域は移動ロボットも通行可能であるとして環境地図を構築する手法⁽⁵⁾がある。また、環境内の人の移動経路から定められた重要点と主要経路を地図として利用する研究⁽⁶⁾がある。これらの手法では、動物体が移動している領域または経路を移動ロボットのナビゲーションに利用するものである。そのため、ロボットが通行する経路上に動物体が存在する可能性が当然高くなり、衝突の機会が増えて移動効率が落ちることが考えられる。また、衝突しない場合にも環境内での人の活動を阻害する可能性がある。

これらとは逆に、人の存在する確率が高い領域を避けることにより人との衝突の可能性が最も低い経路を計画する手法⁽⁷⁾や、動物体の移動方向に対してコストを設けることにより動物体の前方を避ける経路設計をし、人と共存する環境内において効率的かつ人の邪魔にならないナビゲーションを行う手法⁽⁸⁾がある。E. Kruseらの研究⁽⁷⁾では、地図に表現される動的環境の情報は移動経路の有無であり、物体の移動速度や移動頻度などについては議論されていない。また、静的な物体の位置は背景情報として事前に用意しているため、静的な障害物として扱われている物体の位置が変化した場合に

はこの手法は適用できなくなる問題点もある。T. Kruseらの研究⁽⁸⁾では動物体観測により得られる情報は蓄積されず、物体が移動した履歴など長期間観測により得られる情報は地図に表すことができない。

日常環境での人支援を目的とした自律移動ロボットナビゲーションでは、人の活動を阻害することのないロボットの移動計画が必要であると考えられる⁽⁸⁾。そのためには、物体の位置のみならず、人の活動領域を考慮する必要がある。すなわち、人の活動領域を環境地図として表すことにより、人の活動を阻害することなく目的地に到達するナビゲーションを実現できると考えられる。

そこで本研究では、人共存環境における自律移動ロボットのための環境地図として 1) 環境内のすべての物体位置変化に対応する、2) 環境内の物体位置に加え動物体の活動領域を示すことができる環境地図構築手法を提案する。従来、動物体抽出を行う際には背景差分法がよく用いられている⁽³⁾⁽⁷⁾。一方で前述のように、背景と見なした物体の位置が変化すると正確な動物体抽出が行えない問題がある。すなわち、環境の変化にロバストな動物体抽出を行うためには背景を用いないことが望ましい。したがって、本研究では 1) を満足する環境地図構築手法を提案する。次に、2) を考慮することにより、動物体が存在する場合にその存在が地図上に反映され、ロボットは動的障害物を考慮した経路計画が可能となる。

特に本手法の特徴は、動物体の移動経路そのものではなく、移動速度及び移動頻度から定義される移動度合により定められる活動領域を地図上に表現する点にある。活動領域として表現することにより、ロボットは物体の移動が盛んな領域やあまり物体の移動がない領域といったことを把握することが可能となり、動物体と衝突する危険性の低い場所を選択的に通行することが可能となると考える。

2章では環境地図構築システムの各要素機能について説明し、3章では提案システムの検証実験を示す。最後に4章では結論として本研究の成果及び今後の展望について述べる。

2. 日常環境における動的物体を反映した自律移動ロボットのための環境地図構築

2.1 環境計測に基づくグリッドマップ構築

地図構築のための環境計測に、高精度かつ広範囲を計測することができるレーザ測域センサ(北陽電気株式会社製 UTM-30LX)を用いる。センサ周囲 270°において最大 30 m の物体までの距離情報が得られる。環境全体を観測するためセンサは環境内に分散配置する。センサ出力として得られる角度 θ_i とその角度方向における物体までの距離 R_i ($i = 0 \sim 1080$) を xy 平面上の 1 点として座標変換する。このデータをスキャンデータと呼ぶ。スキャンデータを $n \times n$ グリッド

の各セルへと分割しグリッドマップを構築する。

スキャンデータを個々の物体に対応するように分割するため、データのクラスタリングを行う。このとき、空間内の障害物数をあらかじめ決めることはできないため、クラスタリングには階層的手法を用いる。クラスタ間距離の算出には Median 法を使用する。スキャンデータがクラスタ毎に分割された後、そのデータが属するセルにクラスタ番号を与える。

2.2 物体の静動判別および動物体位置推定

本節では静止物体と動物体を判別し、それぞれの位置を算出する方法を説明する。グリッドマップに対応付けられたクラスタの時間変化を評価することにより実現する。詳細を以下に示す。

時刻 $t-1$ で構築されたグリッドマップ (Fig. 1 (a)) と時刻 t で構築されたグリッドマップ (Fig. 1 (b)) が得られたとき、各セルについて差分処理を行うと Fig. 1 (c) で濃い色で示したセルが変化のあった部分として得られる。ここで、変化のあった部分を動物体と判別すると、オクルージョンが発生した場合に、本来は動いていない物体の一部が新たに観測された場合も動物体と判別されることとなる。よって、動物体の誤抽出を防ぐため同一クラスタに属するグリッド群の変化に注目する。

まず、同一クラスタに属するグリッド群の総グリッド数 N_i に対する変化したグリッド数 n_i の割合 ρ_i を求める ($i = 0, 1, 2, 3 \dots$)。このとき、同一クラスタに属する物体の位置変化率である ρ_i が 1 に近づくほどその物体の大部分が変化したといえる。したがって変化率 ρ_i に対して閾値を設け、閾値以上であればそのクラスタは動物体、閾値以下であればその物体は静止物体とする。つまり、同一であるとみなされた物体の大部分が時間的に変化しなかった場合、その物体は静止物体であると判定される。反対に大部分が変化したと見なされれば、動物体と判定される。これにより、オクルージョンの問題により発生する動物体の誤抽出を低減することができると考える。静止物体、あるいは動物体と判定されたクラスタの中心位置を物体の位置として保存する。その後、動物体の位置の時系列データから移動速度 v_c 、移動方向 θ_c を推定する ($c = 0, 1, 2, 3 \dots$: クラスタ番号)。その際、複数の動物体が存在する場合でもそれぞれにおいて移動速度 v_c 、移動方向 θ_c の推定を行うことができるようにするため、現在時刻と 1 ステップ前の位置が近い動物体を同一物体として動物体の位置に近いものを同一物体としてトラッキングを行う。

ただし、動物体が誤抽出される可能性はゼロではなく、誤ったトラッキング結果が生じることがあるため、経験的に定めた閾値以上離れている場合には同一物体とは判定せずトラッキングは行わないこととした。

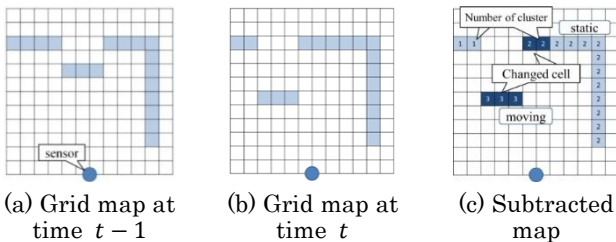


Fig. 1 Moving object detection

2.3 複数センサデータの統合

環境内に分散配置された各センサにより得られた環境情

報を統合し、環境全体の地図を構築する。各センサと接続された計算機のうち、地図統合を行うものを Master、それ以外を Slave とする。その際、Master の計算負荷を減らすと同時に、センサや地図構築システムの不具合により Slave が環境情報を取得できない場合にも Master のみで地図構築ができるよう Master、Slave それぞれにおいて独立して地図を構築した後に統合する。Slave では 2.2 で示した物体の静動判別、動物体移動速度及び移動方向推定まで行い、Master では後述する手法により移動度合から活動領域を表した地図を構築する。統合する際にはセルを足しあわせ、物体位置は最近傍のクラスタの平均値をとる。このとき動物体においては、物体位置に加えて移動速度、移動方向の最も近いものを統合する。統合後は速度、方向ともに平均値を取り Master での動物体とする。

2.4 活動領域を表すための移動度合設計

地図上に動物体の存在する領域を反映した活動領域を示すため、推定された動物体の移動速度 v_c 、移動方向 θ_c に基づきセルへ重み付けを行い、その値を蓄積する。蓄積される値を移動度合、移動度合が付与された領域を動物体の活動領域とする。

重み付けは、式 (1) で表されるような重み付けの対象点の点数を定めることで行う (Fig. 2)。まず、物体の移動方向 θ に対して、動物体の中心 (x_0, y_0) を原点として $\pm\varphi$ の範囲中に $\Delta\varphi$ 毎の n 本の長さ βv の仮想線分を置く。次にその線分上に r 間隔で xy 座標上に重み付けの対象点 $P_{ij} = (P_{ijx}, P_{ijy})$ ($i = 0, 1, \dots, m, j = 0, 1, \dots, n$) を定める。

$$\begin{cases} P_{ijx} = x_0 + i \cdot r \cdot \cos(\theta + \varphi - j \cdot \Delta\varphi) \\ P_{ijy} = y_0 + i \cdot r \cdot \sin(\theta + \varphi - j \cdot \Delta\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

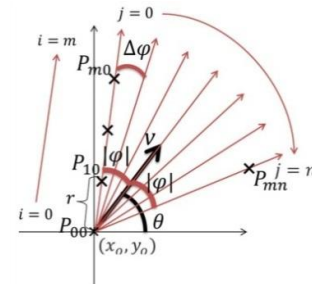


Fig. 2 Arrangement of points as weighting factor

ただし、 $rm \leq \beta v$ 、 $n\Delta\varphi = 2\varphi$ とする。 xy 座標上の対象点の数に基づいて、その点が属するグリッドに重み付けを行う (Fig. 3)。このとき、 $\varphi, \Delta\varphi, r, \beta$ は設定パラメータであり、これら値を変えることにより対象点の密度や範囲を変更でき、セルへの重みの付け方を変えることができる。動物体の移動軌跡を蓄積するのではなく、前述のような条件で重み付けの対象点を設定し移動度合を蓄積することで、物体の移動が盛んに行われている領域を示す活動領域を地図上に表現することができる。

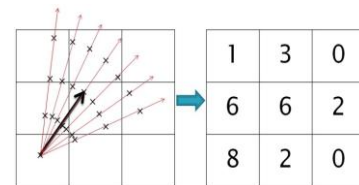


Fig. 3 Calculation of weight value

2.5 活動領域の更新

2.4で示した活動領域は動的に変化する環境において蓄積される。すなわち、時間経過とともに移動度合の重み値を単純に加算する場合、上限を設けたとしても飽和するため、活動領域における動物体の移動頻度、空間の利用頻度という特徴を地図から抽出することが困難となる。したがって活動領域の更新には、長時間観測しても移動度合が飽和せず、活動領域としての特徴を地図から抽出できることが求められる。

この要件を満足するため、本研究では移動度合の重み値を対数的に増加させて活動領域を更新することにより値の飽和を防ぐ手法を提案する。

更新の条件を決定する指針として、その事象の起こりやすさがある。つまり、移動頻度が高ければ更新する度合は小さくてよく、逆に移動頻度が少ない場合には更新する度合を大きくすべきであると考えられる。対数的に増加し、かつこの指針を適用して事象を評価する指標に情報量の概念がある。情報量とは式(2)で表される値であり、事象の起こる確率が低いほど大きく、確率が高いほど小さくなる。情報量 $I(E)$ を求めるための事象の確率 $P(E)$ を環境内の各領域での動物体の移動頻度とすることで活動領域の更新に適したルールとすることができると考える。また、各セルに対する動物体の移動頻度には絶対的な移動頻度 $T = \text{重み付けされた回数}/\text{計測時間}$ 、相対的な移動頻度 $S = \text{重み付けされた回数}/\text{環境全体の重み付けされた回数}$ の二通りが考えられる。これら二通りの移動頻度から $P(E)$ を決定するため、複数の条件からひとつの曖昧な状態を表すことができる Fuzzy 推論を用いる。T, S それぞれの条件から導かれる $P(E)$ を Table 1 に示す。式(2)により求められる情報量 $I(E)$ を重み付けにおける係数とすることにより対数的に値を加算することができ、 $I(E)$ の大小により移動度合の減算量を決めることで更新の条件とする。

$$I(E) = \log \frac{1}{P(E)} = -\log P(E) \quad (2)$$

Table 1 Fuzzy rule table of frequency of movement

| | | S (min ~ 1 ~ max) | | | | |
|--------------|----|----------------------|---|---|---|----|
| | | VS | S | M | L | VL |
| T (0 ~ 1) | VS | VS | S | S | M | M |
| | S | VS | S | M | M | L |
| | M | S | S | M | L | L |
| | L | M | M | M | L | VL |
| | VL | M | L | L | L | VL |

3. 検証実験

3.1 動物体位置推定実験

本研究で提案する環境地図で表現される活動領域は、環境内の動物体の位置変化により導かれる。したがって、環境内の活動領域を表す精度は動物体の位置推定精度に依存する。そのため、動物体位置推定実験を行い、その精度を検証する。

実験環境を Fig. 4 に示す。太線で示した 5 m × 6 m の環境において動物体として人が歩行する環境を計測し、40 × 40 のグリッド地図を構築する。環境内の床上 25 cm の位置にレーザ測域センサ UTM-30LX4 台を設置した。このときサンプリング時間は 0.2 s である。

Fig. 4 に点線で示すように人は中央にある机の周囲を歩行

した。また、動物体の位置計測評価のため、比較対象として超音波式三次元位置計測装置 (以下 ZPS) による計測を行う。この位置を動物体の基準位置として用いる。位置推定結果の比較には誤差に加え、コサイン類似度法⁽⁹⁾による軌跡の類似度計算を用いる。動物体の位置推定結果を Fig. 5 に示す。

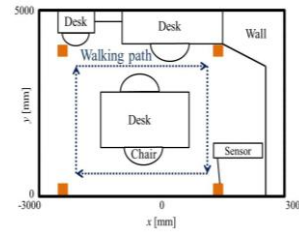


Fig. 4 Experimental setting

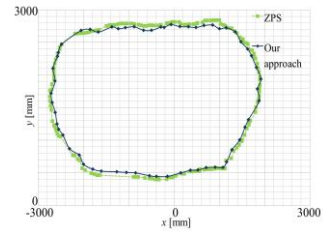


Fig. 5 Obtained walking path

Fig. 5 より提案システムによる位置推定結果と ZPS による計測結果を比較すると、ZPS では観測されない部分があるのに対して、提案システムでは欠落することなく動物体の位置が推定されていることが確認できる。このことから、提案手法によりロボスタな動物体観測ができることが示された。また、平均誤差 63mm, 最大誤差 76mm, 類似度は 0.96 となった。類似度は高いにもかかわらず誤差が生じた。またその平均と最大の値が近いことから、それぞれの計測結果間に常に一定の差が生じていることがわかる。これは、本システムでは物体の中心位置が物体位置として扱われるのに対して、ZPS では身体に取り付けられた超音波発振タグの位置が身体的位置として扱われるために一定の差が生じたと考えられる。その差を考慮すれば、本システムにより物体の移動を高い精度で計測することができると確認できる。以上より、提案手法における活動領域の推定は高精度に行えるといえる。

3.2 環境地図構築実験

本論文で提案された環境地図の有用性を検証するため、実環境における地図構築実験、および構築された地図を用いた経路設計実験を行う。実験環境は 3.1 と同様とし、中央の机で作業を行うことを想定して環境内の動物体である人は自由に移動する。計測時間は 20 分として活動領域の更新は 10 分毎とする。また、重みづけ対象点の設定パラメータは $\varphi = \pi/6$, $\Delta\varphi = \pi/18$, $r = 150$, $\beta = 2$ とする。これらの値は経験的に得られた値を使用している。経路設計には A* アルゴリズムを用い、地図上の活動領域を経路探索におけるコストとしてスタートとゴール間のユークリッド距離によるコストに足し合わせることで適用する。

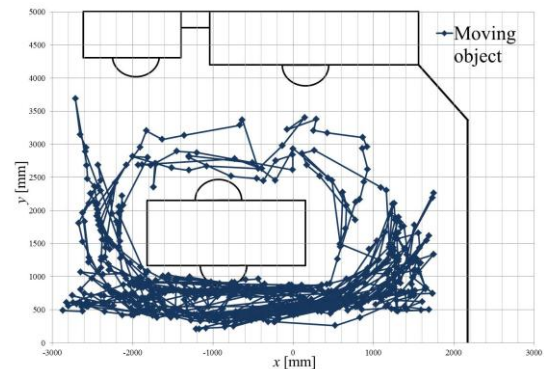


Fig. 6 Result of moving object detection

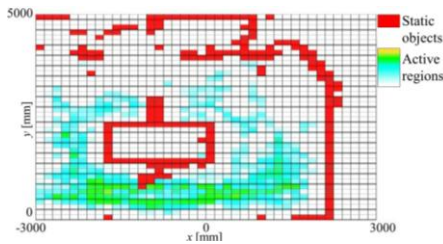


Fig. 7 Result of building a map including moving objects

動物体の位置推定結果を Fig. 6 に、構築された環境地図を Fig. 7 に示す。Fig. 7 において、濃い色で示されている部分が静止障害物を表し、比較的薄く示されている領域が動物体の活動領域を表す。

Fig. 6 に示された人の移動軌跡をみると、図中下部の領域を多く通っており、Fig. 7 で示されているように活動領域を表すことができた。移動頻度の低い図中上部に比べ移動頻度の高い図中下部では移動度合が高く、活動領域の傾向から図中下部では物体の移動がよく起こり、図中上部ではあまり起こらないことが読み取れる。これは作業をする際、中央の机に対して下側の椅子を利用していただけと考える。また、Fig. 6 図中上部に軌跡が示されている一方、Fig. 7 においては図中下部に比べ図中上部はほとんど利用されていないことが分かる。これより、活動領域の更新が適切になされており、提案する地図を用いて空間の利用頻度の差を獲得できることが確認できる。

構築された地図を用いた経路設計実験結果を Fig. 8 に示す。活動領域の経路への影響を比較するため、A*への移動度合のコスト反映率を変えて経路設計を行った。Fig. 8 (a) は反映率 0%、Fig. 8 (b) は 50% をコストに反映、Fig. 8 (c) は 100% をコストに反映した結果を示す。また、設計された経路を黒線で示し、経路左端が開始位置、右端が目的地を表す。

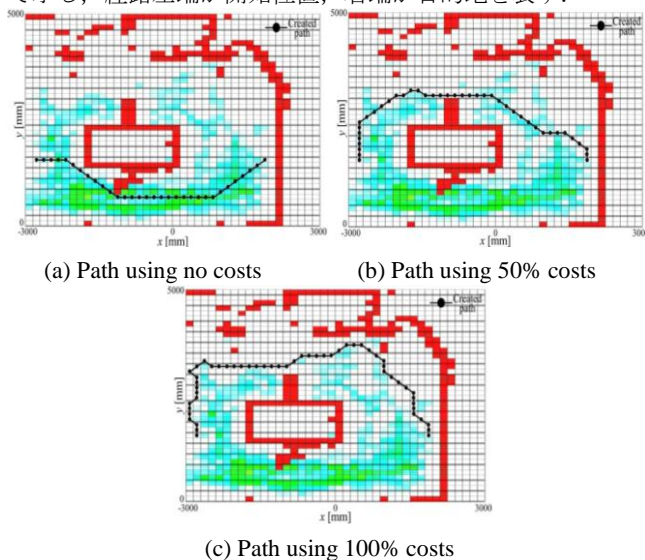


Fig. 8 Results of path planning using a proposed map

Fig. 8 (a) は A* による最短経路である。この経路では、移動度合の高い活動領域をロボットが走行することになり、人の活動を邪魔する可能性が高い。それに対し Fig. 8 (b), (c) では、移動度合の高い領域を避ける経路が引かれている。これより、ロボットが走行中に動物体と衝突する危険性を低下でき、人の活動を阻害しないロボットナビゲーションを行うことができると考える。特に(b)においては移動度合の低い活

動領域を通る経路となっており、活動領域をすべて避ける(c) に比べ効率的な経路であるといえる。また、設計された経路をロボットが走行する際に動物体と衝突する危険性の評価値を経路の長さに対する移動度合 $V=W/L$ (W : 経路上の移動度合, L : 経路の長さ) とすると、 $V_a=3.82$, $V_b=0.33$, $V_c=0.12$ となった。このことから、移動度合を考慮することによりロボットが人の活動領域に進入して走行する割合が減っていることがわかる。以上より、提案手法により構築された地図を利用することにより、より安全で効率的な移動ロボットナビゲーションを行うことができると考える。

4. おわりに

本論文では日常環境における自律移動ロボットナビゲーションのための動的物体を反映した環境地図構築を目指し、環境内の動物体の活動領域を、移動度合に基づき表すことができる地図構築手法を提案した。動物体が存在する実環境で地図を構築し、それを用いた経路設計実験を行った。地図構築実験を通して、精度の高い動物体位置推定が行えること、動物体の移動度合に基づいた活動領域を地図上に反映できることを示した。また、構築された地図を用いた経路設計実験より、人の活動領域を避ける効率的な経路設計が可能であることを示した。

提案手法による地図構築システムは、背景情報を必要としないアプローチであり、対象とする環境が変わった場合にも事前準備することなく適用することができる。また、動物体の活動領域を表すことにより、人の活動領域を避ける経路を設計できるようになり、衝突の危険性低下や人の活動阻害を防ぐナビゲーションを行うことができると考える。本研究では、経路設計をする際に活動領域の移動度合をコストに加算して反映したが、減算して反映することも可能である。減算することで環境内の動物体がよく通る経路をロボットの経路とすることもできると考えられる。

実際の移動ロボットナビゲーションへの適用とその評価が今後の課題として挙げられる。

参考文献

- (1) R. Philippsen, R. Siegwart, Smooth and Efficient Obstacle Avoidance for a Tour Guide Robot, IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, (2003) pp.446-451.
- (2) S. Thrun, M. Beetz, Probabilistic algorithms and the interactive museum tour-guide robot Minerva, Int. J. of Robotics Research, **19**-11 (2000) pp.972-999.
- (3) D. Brscic and H. Hashimoto, Mobile Robot as Physical of Intelligent Space, J. of Computing and Information Technology CIT, **17**-1 (2009) pp.81-94.
- (4) K. Ukai, Y. Ando, Robot Technology Ontology Targeting Robot Technology Services in *Kukanachi*, J. of Robotics and Mechatronics, **21**-4 (2009) pp.489-497.
- (5) S. Yang, C. Wang Feasibility Grids for Localization and Mapping in Crowded Urban Scenes, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (2011) pp.2322-2328.
- (6) T. Sasaki, D. Brscic, H. Hashimoto, Human-Observation-Based Extraction of Path Patterns for Mobile Robot Navigation, IEEE Trans. on Industrial Electronics, **57**-4 (2010) pp.1401-1410.
- (7) E. Kruse, F. M. Wahl, Camera-Based Monitoring System for Mobile Robot Guidance, IEEE/RSJ, Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, (1998) pp.1248-1253.
- (8) T. Kruse, et al. Exploiting Human Cooperation in Human-Centered Robot Navigation, IEEE Int. Symp. on Robots and Human Interactive Communications, (2011) pp.192-197.
- (9) CatTail wiki HP <http://wikiwiki.jp/cattail/>