

歩行中の観測を考慮した情報量に基づく注視制御

光永 法明 浅田 稔 (大阪大学大学院 工学研究科 知能・機能創成工学専攻, 阪大フロンティア研究機構)

Visual Attention Control based on Information Criterion for a Legged Robot

– Robot Observes the Environment while it is Walking –

*Noriaki MITSUNAGA and Minoru ASADA

Dept. of Adaptive Machine Systems, HANDAI Frontier Research Center, Graduate School of Engineering Osaka Univ.

Abstract— Visual attention is one of the most important issues for a vision guided mobile robot. Methods have been proposed for visual attention control based on information criterion^{9, 3)}. However, the robot had to stop walking for observation and decision. This paper presents a method which enables observation and decision while it is walking. It uses the expected information gain from future observations for attention control and decision, and an image compensation to handle the image changes due to the robot motion. Both are used to estimate observation probabilities from the observation while it is walking, then action probabilities are estimated from a decision tree based on the information criterion. The method is applied to a four legged robot. Discussions on the visual attention control in the method and future issues are given.

Key Words: active perception, attention control, information criterion, walking

1. はじめに

視覚センサは移動ロボットにとって有用な外界センサであるが、必要な情報を得るためには注視制御が重要となる。特に多くの場合に視野角は限られており、状況に応じて能動的にセンサの観測方向を変える戦略が重要である。我々は情報量を基準とした行動決定木による、効率的な観測戦略を提案してきた^{9, 3)}。ロボットのタスク遂行のための行動決定に幾何学的な自己位置表現が必ずしも必要ではないことを指摘し、明示的な自己位置表現を使わない手法を提案した。しかし、観測、行動決定時には、ロボットの静止を前提としていた。より効率のよい観測を実現するためには、静止時に加え、移動中の観測も利用できる必要がある。

移動中の観測の利用と行動決定には、

1. 静止時と比較して揺れ等による大きな外乱、
2. 視覚情報の処理に長い時間がかかり、処理終了時には無視できないほど移動している場合や、複数方向の観測(首振り)の統合の際に観測間で移動が無視できない場合、
3. 観測の曖昧さから行動決定に曖昧さが残っている場合には、衝突などの問題を避けるため、移動速度を低下あるいは、静止し観測する必要性、

等の問題がある。車輪式ロボットでは1については、考慮する必要があまりない。2,3については、自己位置計算のためのセンサ統合問題での視覚センサの処理による遅れを考慮した遡及的統合法、必要に応じた移動速度の低下が提案されている^{2, 7, 8)}。しかし、これらの手法は、3次元再構成による自己位置表現を基に行動決定する場合にしか利用できない。Fukase et al.¹⁾は、脚式ロボットが特定の位置へ移動するために、状況に応じて観測か移動行動を選択するため、動的計画法を用いている。状態遷移を部分観測マルコフ決定過程として表し、移動行動と観測行動の行動価値を計算することで、2,3の問題を解いている。しかし、観測は固定

の一通りであり、歩行を誤差の大きな移動としており、歩行に伴う揺れの問題を扱っていない。

揺れの少ないゆっくりとした歩行の場合を除き、脚式ロボットでは多くの場合に揺れは無視できない。宮下ら⁵⁾は、視覚を持つ脚式ロボットが視覚目標物が同じに見えるようにロボットの胴体を揺動制御するとともに、転倒回避をロボットに用意することで、反射的静歩行が発現することを示した。目標が一定の見え方となるよう常に制御し、静歩行することで揺れの問題が非明示的に回避されている。歩行に伴う揺れの対策として、傾斜角センサや加速度センサによる画像情報の補正と選択⁴⁾、揺れモデルを用意したセンサ値の補正⁶⁾が提案されている。しかし、比較的揺れの小さい歩行の場合にしかセンサは有効でなく、注視制御や2,3の問題は考慮されていない。

本論文では、行動確率と観測により将来得られる情報量の期待値を、行動決定の曖昧さの指標として用い、いずれかが閾値を満足しない場合には、移動せずに観測する戦略を用いて3の問題に対処する。また、歩行による揺れや、視点移動の影響を軽減する画像補正メカニズムを提案し、1,2の問題に対処する。

2. 歩行中の観測と注視制御・行動決定

多くの場合、行動決定には観測情報すべてが常に必要ではなく、選択的に観測することで、行動決定を効率化できる。一方、効率の良い観測戦略を得るためには、すべての可能な観測の結果を得て観測の効率を比較する必要がある。たとえば、視野角が限られているが、能動的に観測方向を変えることが出来る視覚センサを持つ移動ロボットの場合には、可能な観測方向すべてについて観測して得られた情報が必要である。

2.1 必要となる画像補正

静止時に観測して行動決定する場合には、各状況での観測情報とそれに対応する行動を、教示などにより

与えることが出来る．しかし，歩行中に観測する場合には，1) 歩行による揺れ，2) 視点の移動が問題となる．揺れにより同じ状況でも観測が異なるため，観測戦略はそれを考慮したものでなければならない．各状況での歩行中の揺れにより異なる観測を十分集めることができれば，情報量による観測戦略は揺れを考慮したものとなると期待されるが，現実的でない．

また視点移動も問題となる．観測戦略を得るために観測情報を収集する際には，同じ状況で視線方向を変えて観測しなければならない．そのためには，歩行を一時停止し，静止して視線方向を変え観測を繰り返すことが出来ればよい．しかし，動歩行の場合には，その場で姿勢を保って静止することは出来ない．一方，観測方向を変えて何度も同じ経路を通るよう移動し，観測を行なうことも考えられるが，現実的でない．

観測情報の収集の問題は，静止して得た観測を基に歩行中の観測戦略を決定できれば，解決する．そこで，1) 観測情報を歩行の揺れについて補正し，静止時の観測に変換すること，2) 視点移動の問題については，観測時から現在までの移動分の補正を観測情報に施すことで，静止時の観測から得た行動決定木を歩行中の観測に利用することを考える．ここでは，歩行中の画像列のみを用いた補正法を提案する．

2.2 歩行中の観測を考慮した意思決定

歩行中の観測には，必要に応じて移動を制限し観測を行なうための適切な指標が必要である．行動確率を指標として用いることも考えられるが，適当ではない．なぜなら，観測が少ないときにも，ある行動の確率が高くなることもあり，誤った行動決定を避けるためには行動確率の閾値を高くしなければならない．

歩行中に観測する場合に行動確率の閾値を高くすると，頻繁に静止し観測することになり，従来の静止時観測と変わらない．ここで行動確率についての信頼度の指標があれば，行動確率の閾値を下げる事が出来ると考えられる．そこで，行動確率と共に，観測により将来得られると期待される情報量 (情報量期待値) を行動の曖昧さの指標 (信頼度) として提案する．

3. 提案手法

ロボットや環境，与えられるデータ等に関して以下のように設定する．

1. ロボットの視覚センサは視野角が限られ，受動的な観測のみでは必ずしも必要な情報が得られない．
2. 能動的観測により，十分な情報が得られる．
3. 教示などにより，全観測方向を観測した際に得られる視覚センサの値と，その際にとるべき行動 (トレーニングデータ) が与えられる (静止観測) ．

歩行による画像の乱れを補正するためのデータは別に与えられる．

3.1 観測による情報量³⁾

行動の種類を r ，トレーニングデータの数を n とする．トレーニングデータ中の行動 j をとった回数を n_j とすると，各行動 $j = 1, \dots, r$ の生起確率 p_j は， $p_j = n_j/n$ である．このとき行動に関するエントロピー H_0 は， $H_0 = -\sum_{j=1}^r p_j \log_2 p_j$ で与えられる．

ランドマーク i が注視窓 $[\theta_{Lk}, \theta_{Uk}]$ の範囲に観測されるか否かが分かったときの事後生起確率を求める．ランドマーク i が $[\theta_{Lk}, \theta_{Uk}]$ に観測された回数を n_{ik}^I ，観測されたときに行動 j をとった回数を n_{ikj}^I ， $n_{ik}^I = \sum_{j=1}^r n_{ikj}^I$ とすると，範囲内に観測される場合の事後生起確率は， $p_{ikj}^I = n_{ikj}^I/n_{ik}^I$ となる．同様に，観測されなかった場合について n_{ikj}^O ， n_{ik}^O ， p_{ikj}^O を求める． $n_{ik} = n_{ik}^I + n_{ik}^O$ として，このときのエントロピーは，

$$H_{ik} = - \sum_{x=\{I,O\}} \frac{n_{ik}^x}{n_{ik}} \sum_{j=1}^r (p_{ikj}^x \log_2 p_{ikj}^x) \quad (1)$$

となり，それぞれの観測による情報量は， $I_{ik} = H_0 - H_{ik}$ である．観測時間が観測対象により異なることを考慮するため，現在の観測対象の次にその観測対象を観測する場合にかかる時間を T とし，単位時間当りに得られる情報量 (情報量速度) $i_{ik} = I_{ik}/(T + T_C)$ ($T_C > 0$) を求める．すでに視覚センサが観測した方向である場合には $T = 0$ とする．

3.2 行動決定木の生成³⁾

行動決定木を次のように生成する．

1. 情報量速度 i_{ik} を全てのランドマーク i ，注視窓候補 k について計算する．
2. i_{ik} を最も大きくする i, k の組により，トレーニングデータを，ランドマーク i が注視窓 $[\theta_{Lk}, \theta_{Uk}]$ 内に観測された場合と，そうでない場合に分ける．

行動が決定できるまで 1,2 を繰り返す．決定木のノード，アーク，葉は，それぞれデータを分割する注視窓，ランドマークの観測の有無，とるべき行動に相当し，注視窓は根から情報量速度が高い順に並ぶ．

3.3 行動決定

行動を決定するには，まず，モデルを使い各注視窓にランドマークが入る確率を，現在の観測あるいは，過去の観測からの予測により計算する．いずれも得られない場合には，各注視窓に入る確率 (観測確率) は 0.5 とする．つぎに，観測確率を用いて将来の観測による情報量の期待値，行動決定木の各葉への到達確率を計算する．同じ行動を示す複数の葉への到達確率の和を，その行動をとるべき確率とする．行動が決定できるまで観測と確率分布，情報量期待値の更新を繰り返す．

各ノードの観測による情報量の期待値は，

$$\hat{I}_{node} = -\left(\frac{n_{node}}{n}\right) I_{node} \{p \log_2 p + (1-p) \log_2 (1-p)\}, \quad (2)$$

である．ただし， n_{node} は， $node$ に到達するデータ数で， I_{node} は行動決定木生成時に計算された情報量， p はランドマークがノードの注視窓内に観測される確率である． p のエントロピー $-\{p \log_2 p + (1-p) \log_2 (1-p)\}$ は，0 から 1 をとり， $p = 0.5$ の時，1 となる．

観測による情報量の期待値の総和 $\sum_{all} \hat{I}_{node}$ が，閾値より小さくなり，ある行動の確率が閾値を越えたとき，その行動をとると決定する．いずれかを満たさないとき，ロボットは静止し，閾値が満たされるまで，情報量期待値 $\sum_{dir} \hat{I}_{node}$ の最も大きな方向の観測と，観測，行動確率の計算を繰り返す．行動決定がされた行

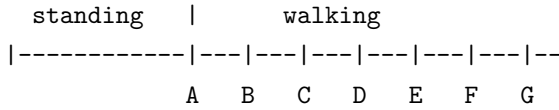


Fig.1 A time sequence example. At time A, it starts walking. A, B, C,... are the beginning of a walking period.

動を実行中も、最も情報量期待値の大きい方向の観測、観測確率と行動確率の計算、行動決定を繰り返し、閾値を満たさなくなると静止して観測し、行動決定する。

3.4 画像の補正法

使用する歩行と観測方向それぞれについて補正値を歩行中の画像列 (Fig. 1) から計算する。ロボットは A の時刻で歩行を開始し、B の時刻が第 2 歩行周期の開始期である。A, B, C,... の時刻を t_A, t_B, t_C, \dots と表記し、時刻 t の画像を U_t とする。歩行の開始初期では、歩行の位相が同じ時刻の画像 U_{t_A+i} と U_{t_B+i} の差に、歩行初期の揺れと移動の両方の影響が含まれる。歩行が定常状態に入ったときには、歩行の位相が同じ時刻の画像 U_{t_F+i} と U_{t_G+i} の差は、移動による影響のみが含まれる。ここで画像の差は、明度差の 2 乗和、

$$D(i, j, \Delta x, \Delta y) = \sum_{com} \{u_i(x, y) - u_j(x - \Delta x, y - \Delta y)\}^2 / S, \quad (3)$$

で定義する。 $\Delta x, \Delta y$ は画像のずれ、 com と $S (S \neq 0)$ は、それぞれ比較する画像の重なる領域とその面積、 $u_i(x, y)$ は、画像 U_i 上の点 (x, y) の明度値である。

まず移動による画像変化の補正値を求める。画像の差 $D(t, t+1, \Delta x, \Delta y)$ が最小となる $(\Delta x(t), \Delta y(t))^T$ を、画像座標上でのカメラの動きとし、各時刻 t について求める。そして、歩行が定常状態である時刻 t について、 W は歩行周期とし、一歩行周期のカメラの動き、

$$\sum_{j=t}^{t+W} (\Delta x(j), \Delta y(j))^T, \quad (4)$$

の平均 \hat{x}_L と分散 σ_L を求める。 \hat{x}_L と σ_L は、移動による画像座標上での変化の平均と分散を表す。

次に、揺れによる画像変化の補正値を求めるが、静止時の画像と歩行時の画像の差には、揺れと移動の両方の影響が含まれている。そこで移動による画像変化分を引き、時刻 t での揺れによる画像変化分を求めると、

$$\sum_{j=0}^t (\Delta x(j), \Delta y(j))^T - \frac{(t - t_k) \hat{x}_L}{W}, \quad (5)$$

となる。ただし、 t_k は t を含む歩行周期の歩行開始時刻を表す。揺れによる画像変化の補正値として、各歩行位相 θ 毎に、歩行初期の揺れの影響を含んだ画像の変化の平均 $\hat{x}_S(\theta)$ と分散 $\sigma_S(\theta)$ を計算する。

観測結果と $\hat{x}_L, \sigma_L, \hat{x}_S(\theta), \sigma_S(\theta)$ から観測確率を計算する。ランドマーク i が画像上の位置 x に時刻 t_1 に観測されたとき、時刻 t に観測が期待される位置は、

$$\bar{x}(t) = x + \hat{x}_S(\theta_{t_1}) + \frac{(t - t_1) \hat{x}_L}{W}, \quad (6)$$

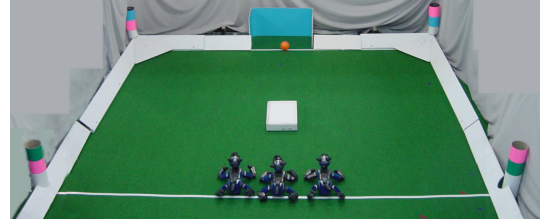


Fig.2 Experimental field (half of the RoboCup 2002 SONY legged robot league).

$$\bar{\sigma}(t) = \sigma_S(\theta_{t_1}) + \frac{(t - t_1) \sigma_L}{W}, \quad (7)$$

となる。ここで、 θ_{t_1} は時刻 t_1 での歩行位相である。 $\bar{x}(t) - \bar{\sigma}(t)$ と $\bar{x}(t) + \bar{\sigma}(t)$ がつくる領域の面積と、この領域が注視窓を覆う面積の比を観測確率とする。

4. 実験

4.1 ロボットと実験環境

RoboCup SONY 4 足ロボットリーグ 2002 のロボットとフィールドの半面を用いた (Fig. 2)。ランドマークは 4、ゴールが 1 ヶ所と、ボールがある。

ロボットのカメラの画角は横 58 度、縦 48 度、画素数はそれぞれ 88, 71 である。首のパン軸はロボット正面に対して、-88 度から 88 度、チルト軸は、-80 度から 43 度が可動範囲である。カメラのフレームレートは最小 40[ms] である。行動としては、前進、左前進、右前進の 3 つを用意した。これらの行動は、トロット歩容を基にしており、画像の揺れについては考慮していない。視覚情報としては、各ランドマークとボールの図心座標、ゴールの画像上での (x, y) 座標が最小/最大となる座標 4 つを用いた。 x, y の直積 (長方形領域) により注視窓を構成し、トレーニングデータを分割した。

4.2 画像の補正結果

Fig. 3 に、カメラを前方に向け、ロボットがゴールを正面に見るフィールド中央の位置から、静止、前進、静止の行動を行ったときの、画像上でのゴールの重心位置について、補正なし、提案する揺れについての補正による中心値、移動に伴い期待される重心位置の変化を示す。補正なしの場合には y 座標に、一歩行周期 (600[ms]) に一度の大きな揺れが見られるのが、補正を行うことで、振幅が減少している。移動にともない期待される重心位置の変化を直線で表しているが、歩行中の移動による平均的な重心位置の変化と一致していることが分かる。 x の変化が前進から静止へ遷移する時に大きくなっているのは、トロットによる前進から静止への滑らかな遷移行動を用意していないためである。必要に応じて、滑らかな歩行遷移あるいは、歩行遷移に関する補正値を用意する必要がある。

4.3 行動決定の様子

ボールがゴール前にあるとき、ボールとゴールを一直線に見る位置へ移動することをタスクとした。フィールド中央の 3 点のいずれかを初期位置とした。フィールド上には、ロボットには見えない障害物があり、ゴー

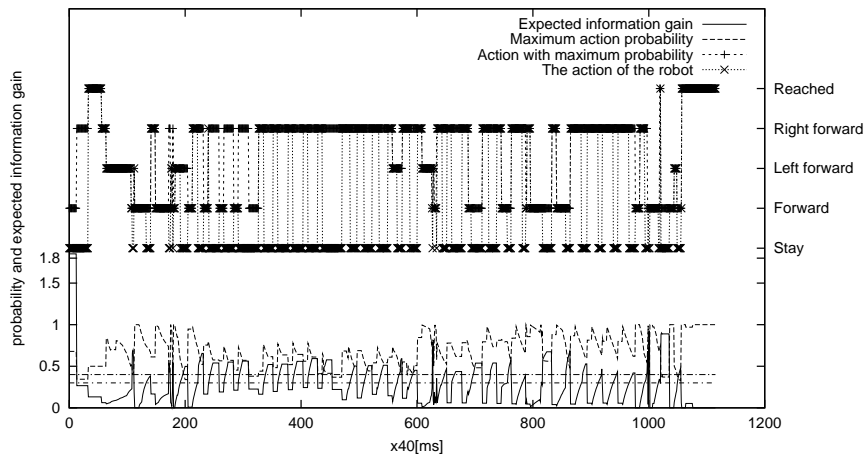


Fig.4 Changes of expected information gain, the maximum action probability, actions which had maximum action probabilities, and which was taken by the robot.

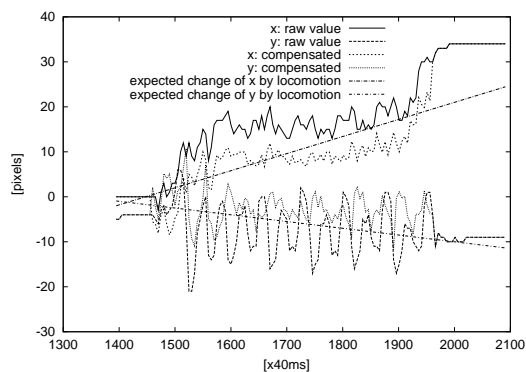


Fig.3 Image compensation by proposed method.

ル正面から行動開始した場合には適切に避けなければならない。パン軸は44度毎の5方向に、チルト軸は21度毎の5方向に分けた。これはカメラの画角より狭いが、カメラの揺れに関わらず特定の方向を観測したときに必ず一定の範囲は観測可能とするためである。239のトレーニングデータを集め、行動決定木を生成した。Fig. 4に、フィールド中央の点から行動開始したときの、観測による情報量の期待値、最大の行動確率とその行動、ロボットのとった行動の変化を示す。最大行動確率の行動とロボットのとった行動は、情報量期待値と行動確率の2つの閾値が満たされているとき一致する。そうでなければロボットは静止し、観測しているため一致しない。情報量期待値の閾値は0.3(観測前の期待値は1.8)とし、行動確率の閾値を0.4とした。行動確率の閾値は低いが、情報量期待値の閾値を満たさない場合には、静止観測を行う。移動行動に伴う行動確率の減少と情報量期待値の増大、観測に伴う行動確率の増大と情報量期待値の減少を繰り返しながら行動決定し、閾値を満たさないときに静止観測している。

5. 結言

視覚センサを有する歩行ロボットのための、情報量に基づく注視戦略を提案した。歩行による揺れを高速

なフィードバック制御や、特別な機構なしに、視覚センサの情報に補正することで移動中の観測を行動決定に用いることを実現した。また観測による情報量期待値を用いることで行動決定の安定性を向上した。

謝辞 本研究の一部は、科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業(CREST)領域「脳を創る」ならびに、文部科学省・科学振興調整費・戦略的研究拠点「フロンティア研究機構」研究プロジェクトの補助を受けた。

参考文献

- 1) T. Fukase, Y. Kobayashi, R. Ueda, and T. Arai. Real-time decision making under uncertainty of self-localization results. 人工知能学会 第15回 SIG-Challenge 研究会, pp. 21-26. 2002.
- 2) A. Kosaka, M. Meng, and A. C. Kak. Vision-guided mobile robot navigation using retroactive updating of position uncertainty. In *Proc. of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1-7, 1993.
- 3) N. Mitsunaga and M. Asada. Sensor space segmentation for visual attention control of a mobile robot based on information criterion. In *Proc. of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1714-1719. 2001.
- 4) 岡田, 加賀美, 稲葉, 井上. 4脚歩行ロボット jrob-1 の視覚に基づく行動制御. ロボティクス・メカトロニクス'99 講演会講演論文集, pp. 1A1-63-096. 日本機械学会, 1999.
- 5) 宮下, 細田, 竹内, 浅田. 反射の組み合わせによる歩行の実現. 日本ロボット学会誌, 18(3):381-386, 2000.
- 6) 原, 福田, 西林, 相山, 太田, 新井. 歩行時の揺れモデルを持つ4脚ロボットによる協調搬送制御. ロボティクス・メカトロニクス'99 講演会講演論文集, pp. 2P2-56-086. 日本機械学会, 1999.
- 7) 前山, 大矢, 油田. 移動ロボットのための遡及的現在位置推定法-処理時間を要する外界センサデータの利用. 日本ロボット学会誌, 15(7):1075-1081, 1997.
- 8) 文, 三浦, 白井. 不確かさを考慮した観測位置と移動のオンライン計画手法. 日本ロボット学会誌, 17(8):1107-1113, 1999.
- 9) 光永, 浅田. 移動体の意思決定のための情報量基準に基づく観測対象選択戦略. 日本ロボット学会誌, 19(6):793-800, 2001.