

AWB を用いた卓上作業の支援

—ユーザ意図認識精度改善のための自走式トレイの配置変更—

太田順 杉正夫 新井民夫
工学系研究科精密機械工学専攻

概要

筆者らは、Attentive Workbench を用いた卓上作業支援システムとして、作業者が指差した物品をユーザに手渡すシステムを提案している。これまで本研究では、ユーザの作業履歴と指差し情報とを統合して作業意図を精度よく推定する手法を提案してきた。本報告では、作業意図の推定精度を高めるために自走式トレイの配置を変更することを提案する。

1 はじめに

近年、ロボットをはじめとする知的システムによって人間の生活を支援することが注目されている。人間の生活の中でも特に、卓上における作業は非常に重要な位置を占めている。

我々は、卓上作業を物理面、情報面の双方から支援するシステムとして、Attentive Workbench (AWB) を提案している[1]。AWB で想定される支援には様々ある[1]が、ここでは「卓上作業者が必要としている物体（以下、これをターゲットと呼ぶ）を自走式トレイによって手元まで搬送する」という支援を扱う。また、本研究では、作業者はターゲットを指差すことによってシステムに指示を与えるものとする。

システムがユーザに対して上記のような支援を行うためには、ユーザの意図するターゲットを知る必要がある。そこで、本研究の目的をユーザの意図するターゲットを正確に推定することとする。

指差しは直感的なインタフェースである反面、得られる情報が曖昧であるという問題がある。これに対して本研究では、ターゲットを正確に推定するために以下の3つのアプローチをとる。

- (a) ユーザの主観的指差し方向を推定することで、指差し認識自体の精度を高める。
- (b) センサから得られる空間情報と、ユーザの行為系列から得られる時間情報を、動的ベ

イジアンネットワークを用いて統合する。

- (c) ユーザの行為系列に基づいて自走式トレイを適切に配置する。

我々はこれまでに、上記(a), (b) の手法を提案し、その有用性を確認している[5]。(a), (b) では、システムはユーザに対して受動的に適応しているが、トレイの配置は固定としているため、ターゲット推定精度には限界がある。これに対して(c) では、トレイが自走式であることを利用し、ユーザに適応して能動的に配置を変更することで、ターゲット推定精度が高まることが期待される。

そこで本論文では、ユーザの行為系列に基づいた自走式トレイ配置手法を提案する。

2 ターゲット推定における課題

筆者らのこれまでの研究[5]では、主観的指差し方向 ϕ_s はターゲット方向 $\theta(T^*)$ 周りの正規分布にしたがうと仮定していたが、指差し方向は角度データであるため分布は $\text{mod } 2\pi$ とならなければいけない。そこで本報告ではより厳密なモデルとして、wrapped normal distribution [6]

$$f(x) = WN(\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{(x - \theta(T^i) + 2\pi k)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (1)$$

を採用する。指差し方向が(1)式の分布に従うものと仮定すると、ターゲットが T^i であるという条件下で主観的指差し方向が ϕ_s である条件付き確率分布は、以下のように表現できる。

$$\rho(\phi_x | T^* = T^i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{(\phi_x - \theta(T^i) + 2\pi k)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$

また、センサから得られる空間情報とユーザの行為系列から得られる時間情報は、動的ベイジアンネットワークを用いて以下のように統合され、ステップ i におけるターゲット T_i^* の推定に用いら

れる。

$$\hat{T}_t^* = \arg \max_{T^i} p(T_t^* = T^i | T_{t-1}^*) \rho(\phi_{st} | T_t^* = T^i) \quad (3)$$

本システムでは(2)を用いてターゲットの推定を行うが、2つのトレイが

- 行為系列に基づく条件付確率の値が近く、
- かつ互いに近接して配置されている

場合、ターゲットの誤推定は避けられない。そこでこのような誤推定が生じないように自走式トレイを配置することが求められる。

3. 力学的モデルによるトレイの配置

前節での議論から、誤推定生起確率を減らすためには、

1. 誤推定がおきやすいと考えられるトレイの間の角度差を広げる

ことが有効であると言える。昨年度報告においては、上記の要求を満たす方法として、各物体（トレイ）間の関係をバネモデルで表し、x-means法に基づいてクラスタリングを行ってトレイを再配置する手法を提案した。しかしこの方法ではトレイの配置が不連続に大きく変化してしまい、どのトレイがどこに動いたかが作業者にわかりづらいという欠点があった。つまり上記の要求に加えて

2. 各トレイの位置が初期配置からあまり大きく動かないこと

も重要だと言える。

本報告では、これら2つの要求を満たすトレイ配置法として、力学的モデルに基づいて配置を徐々に変更する方法を新たに提案する。

3.1 誤推定生起確率の低減

直前のステップにおけるターゲットが T^k であるときの、 T^i と T^j の「行為系列に基づいた誤推定しやすさ」を

$$EA_{ij}^{(k)} = \frac{p_{ki} + p_{kj}}{|p_{ki} - p_{kj}|} \quad (4)$$

と定義する。ここで $p_{ki} = p(T_t^* = T^i | T_{t-1}^* = T^k)$ である。また、 T^i と T^j の「指差しによる誤推定しやすさ」を

$$EF_{ij} \equiv$$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{\frac{\hat{\theta}(T^j) + \hat{\theta}(T^i)}{2} - \hat{\theta}(T^i) + 2\pi k}{2\sigma^2}\right\}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{(\hat{\theta}(T^j) - \hat{\theta}(T^i) + 4\pi k)^2}{8\sigma^2}\right\} \quad (5)$$

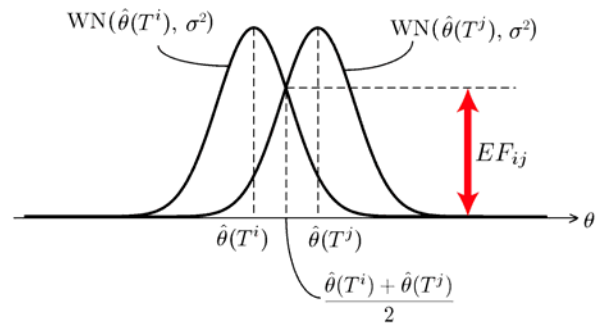


Fig. 1 指差しに基づく判別しにくさ EF_{ij}

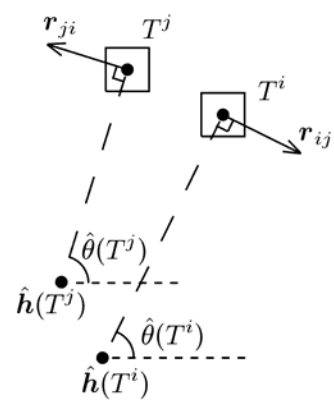


Fig. 2 トレイ T^i と T^j の間の反発力

と定義する。ここでトレイ方向の推定値 $\hat{\theta}(T^i)$ 、 $\hat{\theta}(T^j)$ はそれぞれ T^i および T^j のトレイ方向の推定値であり、過去の指差しデータから最小二乗法によって推定できる。

EF_{ij} の値は、指差し方向がトレイ T^i 、 T^j のちょうど真ん中を向いていると仮定したときの確率密度関数の値である（Fig. 1）。

(4)、(5)式から、直前のステップにおけるターゲットが T^k である時の T^i と T^j の誤推定しやすさを以下の式で表す。

$$E_{ij}^{(k)} = EA_{ij}^{(k)} \cdot EF_{ij} \quad (6)$$

(5)式で定義された誤推定しやすさに比例して T^i と T^j の間に反発力が発生するものとする（Fig. 2）。この反発力は、トレイ方向角度の差を大きくする向きに働く。トレイ T^i が他のトレイから受ける反発力の合力 r_i を次式で表す。

$$r_i = \sum_{j \neq i} r_{ij} = \sum_{j \neq i} c E_{ij}^{(k)} e_{ij}, \quad c = \text{const.} \quad (7)$$

上式の $e_{ij} = (e_{ij}^x, e_{ij}^y)$ は反発力の向きを表す単位ベ

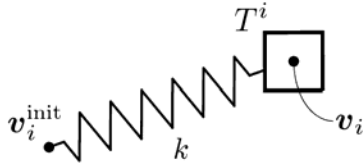


Fig. 3 初期位置と現在位置の間に働くバネ

クトルであり，次式で計算される．

$$\begin{cases} e_{ij}^x = \cos\left(\hat{\theta}(T^i) + \frac{\pi}{2}\delta\right) \\ e_{ij}^y = \sin\left(\hat{\theta}(T^i) + \frac{\pi}{2}\delta\right) \end{cases} \quad (8)$$

ここで，

$$\delta = \begin{cases} 1, & \text{if } \hat{\theta}(T^i) > \hat{\theta}(T^j) \\ -1, & \text{if } \hat{\theta}(T^i) < \hat{\theta}(T^j) \end{cases} \quad (9)$$

である．

3.2 初期配置の影響

ユーザによって決定された初期配置を尊重するために，トレイ T^i の現在位置 \mathbf{v}_i と，その初期位置 $\mathbf{v}_i^{\text{init}}$ との間に自然長 0 の線形バネ力を導入する (Fig. 3)．バネによってトレイに加えられる力は

$$\mathbf{s}_i = -k(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_i^{\text{init}}) \quad (10)$$

と表すことができる．ここで k はバネ定数である．

(10) 式のバネ定数 k と (7) 式の反発力係数 c との比 k/c を小さくすると，初期位置に関わらず誤推定率を低くするようにトレイの配置が変更される．逆に k/c を大きくすると，誤推定率の低減よりもユーザの与えた初期配置を重視するようになり，トレイの配置はほとんど変更されない．

ユーザの好みに応じてこの比を調節することで，初期配置を考慮し，かつ誤推定率を低減するようなトレイ配置が実現できる．

3.3 机の大きさによる制約

机の大きさは限られているため，自走式トレイの配置可能範囲も制限される．したがって，トレイが机からはみ出さないように配置するための項として，トレイ T^i に対して次式で定義される力 $\mathbf{d}^i = (d_i^x, d_i^y)$ を与える．

$$\begin{aligned} d_i^x &= -\exp(v_i^x - w/2 + l) + \exp(-v_i^x - w/2 + l) \\ d_i^y &= -\exp(v_i^y - h/2 + l) + \exp(-v_i^y - h/2 + l) \end{aligned} \quad (11)$$

ただし w は机の横の長さ， h は机の奥行方向の長さである．また l は定数である．

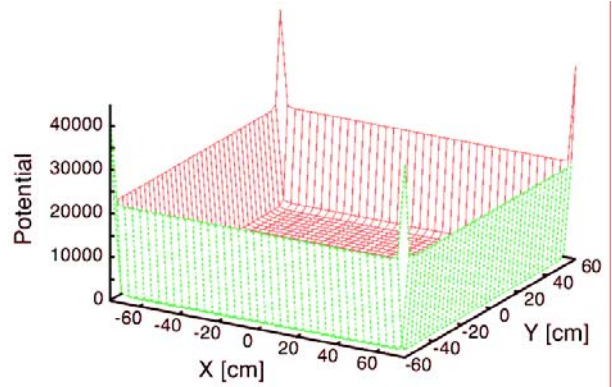


Fig. 4 机の大きさの制約を表すポテンシャル

3.4 トレイ位置の変更

(7), (10), (11) 式より，トレイ T^i に働く全合力 \mathbf{f}_i は以下のように定義される．

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{r}_i + \mathbf{s}_i + \mathbf{d}_i \quad (12)$$

このモデルに従い，トレイの位置を少しずつ変更する．トレイの移動は，次式によって定義される移動ベクトル \mathbf{a}_i を用いて行う．

$$\mathbf{a}_i = (a_i^x, a_i^y), \quad a = \text{const.} \quad (13)$$

トレイ T^i は，他のトレイとの干渉が起きない限り，現在位置からベクトル \mathbf{a}_i だけ移動する．トレイは同時には動かさず， T^1, T^2, \dots と 1 つずつ移動させる．全てのトレイが 1 回ずつ移動することを 1 セットとし，トレイの移動が収束するまでセットを反復する．

トレイ T^i が移動中に他のトレイ T^j と干渉する場合，以下の処理を行う．

- 1) T^i を T^j と接触する位置まで移動させる．
- 2) 1) の移動に対応するベクトルを \mathbf{a}' とし，これを移動ベクトル \mathbf{a}_i から減じる．
- 3) 残りの移動ベクトル $\mathbf{a} = \mathbf{a}_i - \mathbf{a}'$ の接触面に対して垂直な成分を b_i として保存する．
- 4) 1 セットの移動が終了した際， T^i と T^j が接触しており，かつ $|b_i - b_j|$ が閾値を越える場合，2 つのトレイ T^i と T^j の位置 $\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j$ を交換する．

なお複数のトレイと同時に干渉する場合は， $|b_i - b_j|$ の値が最大となるトレイ T^j と入れ替え操作を行うものとする．

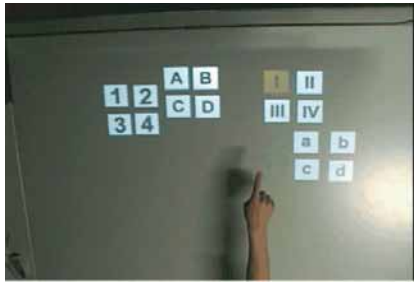


Fig. 5 実験の様子

4. 実験

提案するトレイ配置手法を実装し、実験を行った。Fig. 5 に実験の様子の一例を示す。同種の数字のグループは一連のタスクを表しており、タスク内でユーザの指差すトレイの順序は以下のように固定されている。

- アラビア数字：1→2→3→4
- ローマ数字：I→II→III→IV
- アルファベット大文字：A→B→C→D
- アルファベット小文字：a→b→c→d

タスク内の順序は固定されているが、あるタスクの次にどのタスクが来るかは一意でない（例えばアルファベット大文字の次はアラビア数字であったりギリシャ数字であったりする）。

指差しを繰り返すうちに提案手法に従ってトレイの配置が変更される。Fig. 6 左に初期配置の例を示し、指差しに応じて配置が変化した場合の例を Fig. 6 右に示す。

前述のように同一タスク内でのトレイの指差される順序は固定されているため、行為系列の学習によりターゲットを精度良く推定できる。一方、タスクの切り替わり（あるタスクが終わって次の別なタスクが始まる時）では、行為系列からターゲットを推定することはできないため、指差し方向の情報だけから推定を行うこととなる。

Fig. 6 左の配置の場合、4つのトレイ1, I, A, a はそれぞれ4つのタスクの開始の際に指差され、指差しの情報だけによって識別される。トレイ1とI、およびAとaとが互いに指差し方向が近く間違えやすいが、Fig. 6 右を見ると、提案手法によってトレイ1とI、およびAとaの指差し方向が遠ざかるよう配置が変更されていることが確認できる。

トレイの配置を固定した場合と提案手法によって変更する場合 ($k/c=10$ とした) とのターゲット推定精度の比較を行った。全体としての精度は固定の場合が91.8%、提案手法が95.3%とあまり大きな差が見られなかったが、タスクの切り替

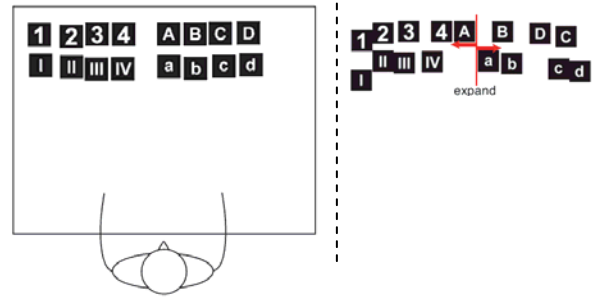


Fig. 6 初期配置（左）と配置変更後（右）

わりに相当する場合を比較すると、固定の場合の精度が56.3%に止まったのに対して、提案手法によってトレイ配置を変更する場合は81.3%となった。以上により提案手法の有効性が確認された。

5. おわりに

本論文では、ユーザの過去の行為系列に基づいてトレイ位置を変更することで、指差しによるターゲットの誤推定率を低減する手法を提案した。

今後は、実機トレイ群の制御システムと統合し、被験者実験等によって、ユーザインタフェースとしての使いやすさという観点から評価を行う予定である。

参考文献

- [1] 木村他: “作業者配慮型生産システム第1 報研究概要,” 2003 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p.640, 2003.
- [2] K.Oka et al.: “Real-Time Fingertip Tracking and Gesture Recognition,” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.22, No.6, pp.64–71, 2002.
- [3] X.Chen et al.: “Evaluation of Thrust Force and Positioning Accuracy of a New Linear Motor,” Proceedings of the 6th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, p.126, 2003.
- [4] K.Kotani et al.: “Model for Cardiorespiratory Synchronization in Humans,” Physical Review E, Vol.65, 051923, pp.1–9, 2002.
- [5] Y. Tamura et al.: “Deskwork Support System Based on the Estimation of Human Intentions,” Proceedings of the 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, pp.413–418, 2004.
- [6] E.J. Gumbel et al.: “The Circular Normal Distribution: Theory and Tables,” Journal of the American Statistical Association, Vol.48, No.261, pp.131–152, 1953.