

可変区間型予測証券を用いた 社内予測市場システムの開発と評価実験

Development and Experimental Evaluation of an Intra-Company Prediction Market System Using VIPS

水山 元¹

Hajime Mizuyama¹

¹ 京都大学

¹Kyoto University

摘要: 本研究では、集合知を活用した社内予測ツールとして、独自の予測市場システムを開発し、その基本性能に関する評価実験を行う。提案システムは、予測証券として、可変区間型予測証券（VIPS）を採用しており、それに適したマーケットメーカーエージェント（MMA）によって駆動されていく。MMAは、ある正規分布に従う価格密度でVIPSの単価を評価しており、その価格分布（すなわち、MMAにとっての予測分布）を、取引履歴に応じて、ベイズ学習を模擬したロジックで更新していく。ラボラトリ実験によって、本システムがある程度妥当な予測分布を出力し得ること、本システムを不安定化させる不正な裁定行動は本人に不利に働くこと、したがって長期的には比較的安定した性能が期待されること、などを確認する。

Abstract: This research develops an intra-company prediction market system as a collective-knowledge-based forecasting tool for a company and evaluates its performance through laboratory experiments. The system uses the variable-interval prediction security (VIPS) as the prediction security to be traded in the market and is controlled by a computerized market maker suitable for the security type. The market maker evaluates each unit of VIPS with a Gaussian price distribution and updates the distribution intermittently through a Bayesian-learning-like updating logic according to the transactions in the market. The laboratory experiments with a virtual demand forecasting problem confirm that the output price distribution can serve as an approximate forecast distribution. Further, the system is capable of penalizing troublesome arbitrage actions and hence its performance will be fairly stable.

1. はじめに

変化の激しい近年の市場環境の中で、企業の意思決定を支援し得る新たなリソースとして、社内外の関係者の間に分散して存在している、公式、非公式を問わない、動的で雑多な知識の集まり（＝集合知）が注目を集めている。これを実際に意思決定支援に供するためには、分散している知識の断片を効果的、効率的に集約し、問題に応じた適切な形式に表出化させる必要がある。その形式は、何に関する知識が求められているかに依存するが、例えば、新製品の販売量、新規プロジェクトのリードタイムなどの未実現の量的な確率変数に関する知識が求められている場合、集合知を当該確率変数の予測分布に反映さ

せることが問題となる。

これに対して著者らは、関連する集合知を捕捉し、表出化させるためのメカニズムとして、予測市場[1-3]に注目し、対象変数に関する、主として社内の関係者らの知識を集約し、それを反映させた予測分布を得るための独自の予測市場システムを開発している[4,5]。本報では、本システムの基本設計について簡単に述べた後、その性能評価実験の概要、結果およびその含意について論じる。

2. 提案システムの基本設計

2.1 提案システムの概要

* 連絡先：京都大学工学研究科機械理工学専攻
〒606-8501 京都市左京区吉田本町
E-mail: mizu@me.kyoto-u.ac.jp

予測市場とは、対象変数の未知の実現値に依存して価値の決まる証券（予測証券と呼ぶ）を売買する一種の先物市場であり、時々刻々変化する予測証券の時価から、対象変数に関する、市場参加者の知識を反映した、動的な予測を得るものである。一般には、いくつかの排反事象の中からどれが生起するか、といった質的変数を対象とするものが多いが、提案システムでは、量的変数 x を対象とし、その予測分布を得るために、可変区間型予測証券（Variable Interval Prediction Security: VIPS）を用いている。VIPS とは、対象変数 x の実現値が、あらかじめ指定した予測区間内に収まった場合、その場合にのみ、事後的に所定額のリターンが得られる予測証券であるが、予測区間を自由に設定できるところに特徴がある。

提案システム運用の概要は次の通りである。

- 提案システムは、対象変数 x について何らかの知識をもっていると考えられる、比較的少数の社内の関係者らの間で、ある一定の期間運用される。
- 市場参加者は、システムが提供するマーケットメーカーエージェント（MMA）との間で、対象変数 x に関する VIPS を取引する。この取引には、仮想通貨（PS）を用いる。
- 各市場参加者 k ($=1, 2, \dots, K$) は、初期資産として一定額の仮想通貨（PS）を与えられ、それを VIPS に投資することで事後資産を最大化するように動機付けされる。
- VIPS には、対象変数 x の実現値が、指定された予測区間に含まれていた場合、その場合に限り、事後的に、一枚あたり所定額の仮想通貨（PS）が支払われる。
- 各市場参加者 k は複数枚の VIPS を所持することができるが、それらの予測区間はすべて等しくなければならないとする。したがって、彼女／彼の VIPS の所持ポジションは、予測区間 $[a_k, b_k]$ と枚数 v_k の組 (a_k, b_k, v_k) で表現できる。また、このとき、手元に残っている仮想通貨額を u_k (PS) とする。
- 各市場参加者 k は、手元資金 u_k が負にならない限り、所持ポジションのパラメータ (a_k, b_k, v_k) を変更することで、VIPS の買い増し、一部売却、予測区間変更などを、MMA との取引として、容易に実現することができる。
- MMA は、正規分布の価格密度関数 $g(x) = N(\mu_g, \sigma_g^2)$ をもっており、それを、指定された予測区間にわたって積分することで、任意の VIPS の単価を評価する。

- 価格分布 $g(x)$ は、したがって、MMA にとっての予測分布であるといえる。MMA は、任意の市場参加者の VIPS 所持ポジションの変更をトリガーとして学習し、価格分布 $g(x)$ を更新していく。

2.2 不正な裁定行動とその防止

提案システムでは、MMA の価格分布更新アルゴリズムが重要な役割を果たす。既報[6]では、単純な加重平均による更新ロジックでは、次のような不正な裁定行動が誘発され、それによって、システムの性能が阻害されることがわかった。

- ある予測区間を大量に購入し、当該区間の価格を上昇させた後、それらをすぐに売却することで差益を得る。
- 所望の区間とは異なる区間をまず大量に購入し、所望の区間の価格を下落させた後、その区間を安値で購入する。

そこで、提案システムでは、インベントリ基準の更新ロジックと、簿価制約とを導入することで、これらの裁定行動に対処する。

インベントリ基準の更新ロジックとは、任意の市場参加者 k が所持している VIPS のインベントリを:

$$s_k(x) = \begin{cases} v_k & (a_k \leq x \leq b_k) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

などで表し、市場に出回っている全インベントリを:

$$S(x) = \sum_{k=1}^K s_k(x) + s_0(x) \quad (2)$$

としたときに、価格分布 $g(x)$ のパラメータを、 $S(x)$ の汎関数として定めるものである（ここに、 $s_0(x)$ は、初期の価格分布や更新感度を操作するための関数）。このタイプのロジックには、一旦購入（売却）した VIPS を売り払った（買い戻した）場合に、価格分布が元に戻るという特長がある。ここでは、 $S(x)$ の分布の平均と分散でパラメータを与える方式を採用する。これは、各市場参加者 k の VIPS 所持ポジションを学習サンプルとみなしたもとの Bayes 学習で、事後の t 分布を正規近似しているとみなせる。

取引タイミングごとの間欠的な価格更新は、市場参加者にとってわかりやすい。しかしその一方で、価格更新ロジックの工夫だけで前述の裁定機会を防止してしまうことは難しいという難点がある。そこで、簿価制約を併せて導入する。すなわち、VIPS 購

入時に、その時の価格分布を、その部分に対応する簿価情報として保持しておき、途中で一部でも売却する際には、当該区間の時価と（平均）簿価の安い方の価格で決済することにする。これによって、どのような売買を繰り返したとしても、途中で資産額が増加することはなくなる（資産額は、事後的なリターンのみによって増加し得る）。さらに、任意の市場参加者が VIPS 所持ポジションを更新する際に、売却分のみを先に決済し、そこで一旦価格更新をばさんだ後で、購入分を決済するようにすることで、価格分布の恣意的な操作を防止する。

3. 提案システムの性能評価実験

3.1 架空の予測問題と実験概要

提案システムの基本的な性能を確認するために、架空の销售量予測問題を対象として、実験室実験を行った。架空の予測問題は、図1のような1月から9月までの销售量推移の実績を提示して、12月の销售量 x_{12} を予測してもらうものである。销售量推移のデータは、次式の線形モデル：

$$x_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot (t - 6.5) + e \quad e \sim N(0, 300^2) \quad (3)$$

に基づいて作成した。ただし、 β_0 および β_1 はそれぞれ一様分布[2250, 2750]および[-87.5, 100]からの乱数で与えている。

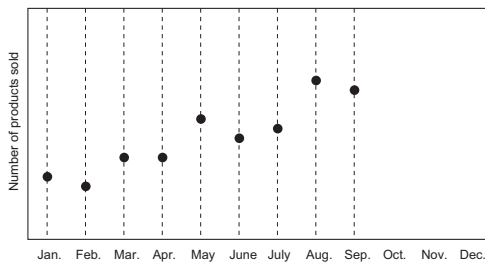


図1. 架空の销售量推移データの例

被験者（市場参加者）は、京都大学の学部生および大学院生、男女あわせて7名で、合計12回の実験タームを、それぞれ異なる销售量推移データを用いて行った。各タームの初期資産は100 (P\$)、VIPS1枚あたりのリターンは1 (P\$) とした。ターム毎に被験者を事後資産額で順位付けし、その順位に応じて当該ターム分の謝礼を変化させることで動機付けを行っている。

表1. 線形回帰および提案システムによる予測

Term	Pe	Dlt	μ_g	σ_g
1	2583	542	2730	440
2	3302	962	2991	513
3	2383	990	2118	561
4	2838	583	2968	752
5	2717	764	2677	629
6	2807	724	2848	583
7	2459	571	2636	449
8	3052	379	2999	549
9	2199	1233	2231	452
10	2256	906	2028	611
11	1832	813	2223	574
12	2611	1352	2438	568

3.2 実験結果と考察

表1に、各実験タームで、销售量推移データに線形回帰を適用して得られた対象変数 x_{12} の点推定値 Pe および95%信頼区間幅の半分 Dlt とともに、提案システムで得られた最終的な価格分布の平均 μ_g および標準偏差 σ_g を示す。表中の Pe と μ_g の間の相関係数は0.853となり、提案システムは、ある程度妥当な平均を捉えていることがわかる。一方、 Dlt と σ_g の間の相関係数は、-0.101と、わずかながら負の値になっている。この現象は、式(3)の誤差項の標準偏差を変化させなかったことにも一因はあるが、被験者の一部が行ったアブノーマルな売買行動に大きな原因があったと考えられる。以下では、このアブノーマルな売買行動についてさらに検討を加える。

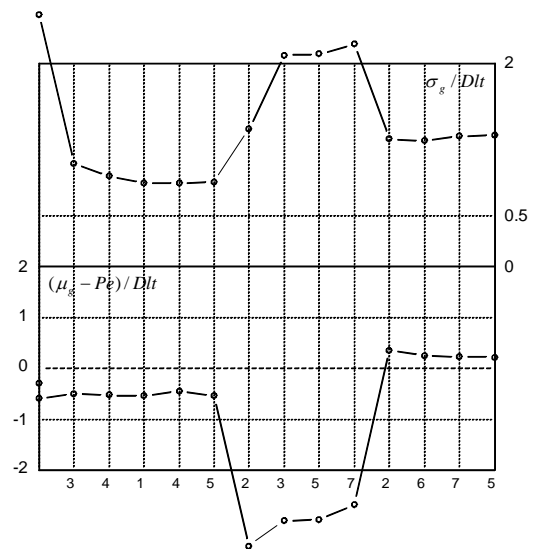
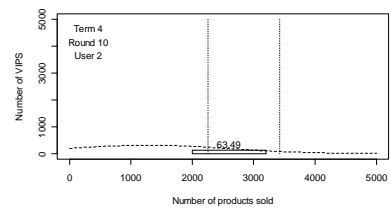
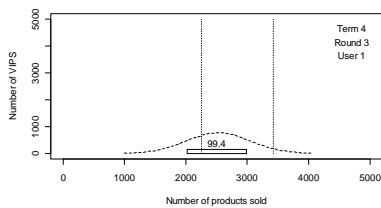
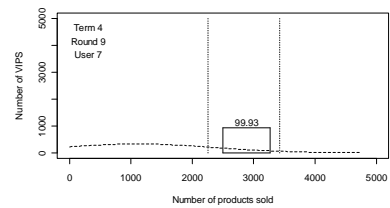
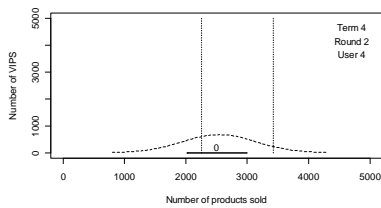
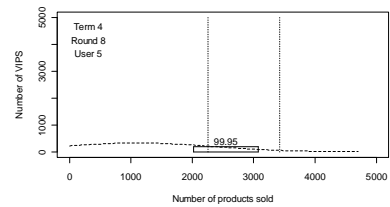
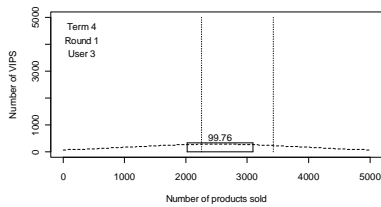
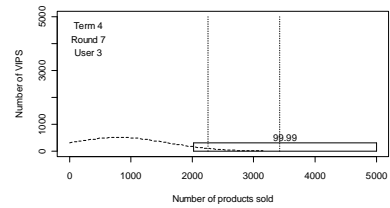
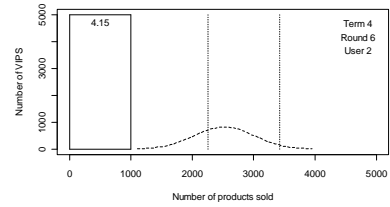
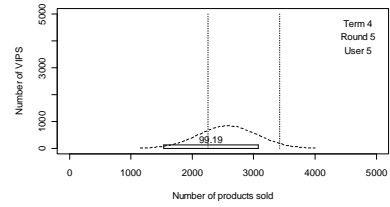
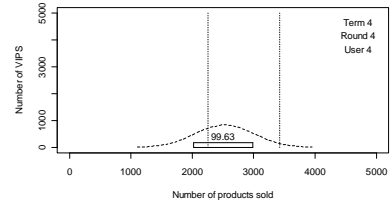


図2. 実験ターム4の価格分布の推移

図2は、上述のアブノーマルな売買行動が見られた場合の一例として、実験ターム4での価格分布の推移を表したものである。上下二つの折れ線グラフのうち、上は σ_g/Dlt の推移を、下は $(\mu_g - Pe)/Dlt$ の推移をそれぞれ表している。横軸に沿った下の数値は、各更新ラウンドでトリガーとなった市場参加者のIDである。図から、市場参加者2の6ラウンド目と10ラウンド目の取引が価格分布を大きく変動させていることがわかる。最終的に、平均 μ_g はある程度妥当な値に戻っているが、標準偏差 σ_g はかなり過大なままである。

図3は、この過程を、より詳細に分析するために、市場参加者の売買行動の履歴を表したものである。図から、市場参加者2は6ラウンド目で上述の裁定行動を試みていることがわかる。ただし、10ラウンド目からも明らかなように、この試みは成功していない。しかしながら、6ラウンド目で生じた価格分布のひずみが、7ラウンド目で、市場参加者3の幅広い予測区間の購入につながり、その後、安価で購入したこの区間を売却する動機が生じなかったために、平均、標準偏差ともに正方向のバイアスが残ってしまったことが見てとれる。また、別のタームでは、アブノーマルな売買行動で生じた価格分布のひずみを、意味ある情報と誤解してしまい、それに流されて、追従するような売買行動をとる市場参加者も見られた。これも結果的に価格分布にバイアスが残る原因となり得る。



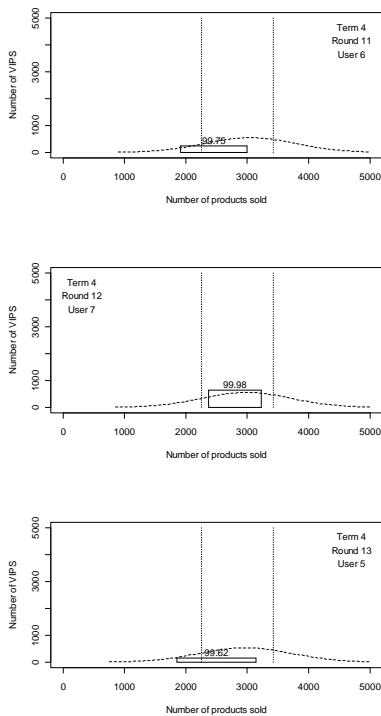


図 3. 実験ターム 4 の売買行動履歴

他の実験タームのいくつかでも、同様に裁定行動を試みた市場参加者は存在したが、どの試みも成功してはならず、事後資産額にとってむしろ不利に働いていることが確認された。アブノーマルな売買行動が利益につながらないことが認識されると、そうした行動は徐々に消えていくと予想される。図 4 は、アブノーマルな売買行動が見られなかった場合の一例として、実験ターム 6 での価格分布の推移を表したものである。図から、このケースでは、価格分布は、妥当な予測分布に向かって滑らかに収束していることがわかる。これらのことから、提案システムには、現状で、少なくとも中長期的には比較的安定した性能が期待される。

しかし、実験ターム 4 の 6 ラウンド目と 7 ラウンド目の挙動から示唆されるように、複数人が協力した場合は、裁定行動は必ずしも不可能ではない。また、多少不利になることはわかりながら、愉快犯的にアブノーマルな売買行動を行う市場参加者も出てくるかもしれない。社内の関係者での運用では、これらのことにさほど心配は必要ないと思われるが、何かの手違いでアブノーマルな売買行動をとってしまう恐れもある。したがって、上の例のように、極端な低コストで価格分布を大きくひずませてしまう可能性があるという問題に対しては、何らかの対策が望まれる。

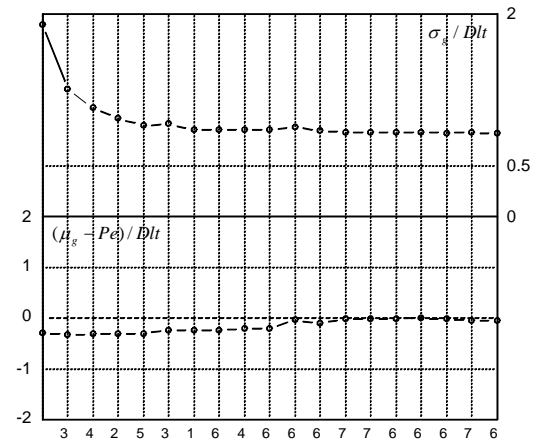


図 3. 実験ターム 6 の価格分布の推移

4. おわりに

本報では、可変区間型予測証券を用いた社内予測市場システムの基本設計を提案した上で、その性能評価のために実験室実験を行い、得られた結果について検討した。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤(B) 20310087）の助成による。

参考文献

- [1] Plott C.R.: Markets as Information Gathering Tools, Southern Economic Journal, Vol. 67, pp. 1-15 (2000)
- [2] Pennock D.M., Lawrence S., Giles C.L., Nielsen F.A.: The Real Power of Artificial Markets, Science, Vol. 291, pp. 987-988 (2001)
- [3] Wolfers J., Zitzewitz E.: Prediction Markets, Journal of Economic Perspectives, Vol. 18, pp. 107-126 (2004)
- [4] Mizuyama H., Kamada E.: A Prediction Market System for Aggregating Dispersed Tacit Knowledge into a Continuous Forecasted Demand Distribution, Advances in Production Management Systems, Olhager J., Persson F. (eds.), Springer, pp. 197-204 (2007)
- [5] 水山 元, 鎌田瑛介: 予測市場システムに基づく衆知集約型需要予測法の研究, 日本経営工学会論文誌, Vol. 59, No. 4, pp. 330-341, (2008)
- [6] Ueda M., Mizuyama H., Asada K., Tagaya Y.: Laboratory Experiments of Demand Forecasting Process through Intra-Firm Prediction Market System Using VIPS, Proc. of 9th APIEMS Conference, CD-ROM, (2008)