

ランデブーを含む virtual text による

7 S-3

自動伴奏システムの表現とその検証*

白銀 哲也 (筑波大学 工学研究科) †

辻 尚史 (筑波大学 電子・情報工学系) †

五十嵐 滋 (筑波大学 電子・情報工学系) †

水谷 哲也 (筑波大学 電子・情報工学系) †

1 はじめに

CSP[1], [2]を拡張し、音楽情報処理のための並行プログラミング言語 CMP (Communicating Musical Processes) を提示する。

我々の研究グループでは入力信号に対し 0.5 秒遅れて反応する MIDI 楽器 (グランドピアノ) を制御して、人間の主旋律の演奏に合わせて伴奏する自動伴奏システムを実装中である。演奏の速さに注目すると、正常な演奏は主旋律と伴奏が適当な間隔で同期している状態と考えられる。CMP において、主旋律と伴奏を各々 1 つのプロセスとして捉え、この状態をランデブー概念を用いて記述した。さらにこれを Luckham が提唱している virtual text すなわち新たなプログラムによる仕様記述として捉え、システムの正当性を証明した。

2 virtual text

プログラムを作成するときには一般に注釈をつけてテキストの表面には現れないインフォーマルだが本質的な情報を付加し、人間がプログラムを読むときの助けとする。Luckham は [4] で注釈の概念を厳密化・形式化しそのプログラムがどの様に振舞うかを表す新たなプログラムを注釈に書くことを提唱している。こうして書かれた注釈のプログラムを virtual text と呼ぶ。virtual text は、「実行可能だが、実際には実行されないプログラム」であり、もとのプログラムの仕様を記述するもので実行速度やメモリに対する効率よりは人間にとって理解し易いことが重視される。そのために元のプログラムに比べより論理的な、あるいはより高級なプログラミング言語で記述されるべきである。

本論文では提示し、virtual text の記述言語として CMP をとりあげる。

3 CMP

今回は [2] の CSP にリスト構造と、呼出し時の時刻を得る関数 time、与えられた音価の音を (MIDI ピアノで) 出力する命令 play を導入したものをを用いる。また、時間は、非負有理数全体の集合 $Q^{\geq 0}$ の要素と考える。

なお代入、通信、ガードの評価、play 命令にかかる時間は各々一定とし K_a, K_c, K_g, K_p で表す (単位は秒)。これらは十分に小さい値と仮定できる。

*Description and Verification of an Automatic Accompaniment System by a Virtual Text with Rendezvous

†Tetsuya Shirogane, Doctoral Program of Engineering, University of Tsukuba

‡Shigeru Igarashi, Takashi Tsuji and Tetsuya Mizutani, Institute of Information Sciences, University of Tsukuba

3.1 自動伴奏プログラムの virtual text

正常な演奏を、主旋律と伴奏が各小節の最初について適当な範囲内で同期している状態とする。

実装中のシステムは MIDI 信号を受け取ってから 0.5 秒遅れて音を出すピアノを制御するために、各音符の適切なタイミングの 0.5 秒前に信号を送らなければならない。

自然な演奏には流れがあることから、曲の中でのその小節の位置と、それまでの小節の実演奏からその小節の長さがある程度予測することが考えられる。そのための関数 est-tempo があるものとする。ここで小節番号に多くの情報があるものとみなし、また模範的な演奏データも持っているものと考えて、est-tempo は現在の小節番号とそれまでの各小節の実演奏の長さのリストから現在の小節の長さを予測するものとする。

主旋律、伴奏を各々 1 つのプロセスと考えれば各小節の最初で

1. 伴奏が主旋律よりも δ 秒遅い

2. または主旋律が伴奏よりも δ' 秒遅い

場合に演奏を中止するプログラムを考える。

演奏はプログラム開始の 0.5 秒後から始めるものとし、演奏が終了するのは、主旋律と伴奏がある範囲内で同期しなかった場合とし、曲の終了の処理については省略する。作成した virtual text を図 1 に示す。perform は人間の演奏データである。

実際はプロセス「人間」と「人演」を人間が、「指ピ」を MIDI ピアノが担当する。

3.2 正当性と est-tempo

任意の小節番号 i について、

$$A_i \equiv -\delta - \Delta_i < T_i^{play} - T_i^{est} < \delta' + \Delta_i$$

とおく。ただし、 $\eta(i)$ をその小節の主旋律の音符の数とし、

$$\Delta_i = -2 \times K_c + (\eta(i) - 2) \times K_a + \eta(i) \times K_g + \eta(i) \times K_p$$

$$T_i^{play} = i \text{ 小節目の人間の演奏の時間}$$

$$T_i^{est} = \text{est-tempo による } i \text{ 小節目の演奏時間の予測}$$

とする。 A_i は i 小節目の人間の演奏の長さ T_i^{play} と est-tempo によって得られた予測 T_i^{est} が $\delta + \Delta_i, \delta' + \Delta_i$ の範囲で一致していることを意味する。

これらを用い、次の定理が導ける [8]。ただし N^+ は正整数全体の集合とする。

定理 1 条件

$$\forall i \in N^+ (A_i) \quad \dots \quad (\alpha)$$

を満たすような *perform, est-tempo* ならば

$$T_i^{acc} = i \text{小節目の伴奏の開始時刻}$$

$$T_i^{princ} = i \text{小節目の主旋律の開始時刻}$$

とすると

$$-\delta - 3K_a - K_g - 2K_c < T_i^{acc} - T_i^{princ} < \delta + 3K_a + K_g + 2K_c$$

が成立、すなわち主旋律と伴奏が適当な範囲内で同期し、正常な演奏を続ける。

人間の主旋律に計算機が伴奏を合わせる立場では、予想される *perform* つまり人間の標準的な演奏について、式 (α) を満たすような *est-tempo* を採用する必要がある。

4 結び

遅れを伴う MIDI 楽器を用いた自動伴奏システムの演奏速度を制御するプログラムの *virtual text* を、CSP においてランデブー概念を用いて記述し、その正当性を証明した。

今後の課題としては

1. 今回作成した *virtual text* をもとに実装を進めること (単旋律でない曲への対応等、実際の自動伴奏システムにより近い仕様の記述)
2. 今回は省略したが、定理の証明には [2] の体系を用いたところ大変複雑なものになったので、[6], [7] で提唱する体系を発展させたものを導入して簡潔にすること

があげられる。

```

人間 || 人演 || 指弾 || 指演 || 指ピ
ただし
人間 == i := 1; cont := 1; delay 0.5;
      *[cont = 1 → a!i; t := time;
        [elt → i := i + 1
          □ delay δ → cont := 0];
        a'7h]
人演 == *[a?i' → x := perform(i');
          *[x ≠ nil → play first(rest(first(x)));
            delay first(first(x)); x := rest(x)];
          a'10]
指弾 == t_0 := time; cont' := 1; j := 1; t' := 0; t'' := 0; z := nil;
      *[cont' = 1 → delay (est-tempo(j, z) - 0.5 - (t'' - t'));
        dtj; d!tempo; t'' := time + 0.5;
        [e?t' → tempo := t' - t_0; t_0 := t';
          j := j + 1; z := (tempo . z)
          □ delay (δ + 0.5) → cont' := 0] ]
指演 == y := nil; z' := nil;
      *[d?j' → d?tempo'; y := music(j'); u := first(y); z' := (tempo' . z')
        □ y ≠ nil; delay (est-tempo(j', z') × first(u))
          → u := first(y); c!first(rest(u)); y := rest(y); ]
指ピ == k := 1; *[c?n → [k = 1 → c_1!n; k := 2
                        □ k = 2 → c_2!n; k := 3
                        ...
                        □ k = 128 → c_128!n; k := 1]]
      || *[c_1?n_1 → delay 0.5; play (n_1)]
      || *[c_2?n_2 → delay 0.5; play (n_2)]
      ...
      || *[c_128?n_128 → delay 0.5; play (n_128)]
    
```

図1 自動伴奏プログラムの *virtual text*

References

- [1] Hoare, C. A. R. : Communicating Sequential Processes, *Comm. ACM* 21, 1978, pp. 666-677.
- [2] Hooman, J. : *Specification and Compositional Verification of Real-time Systems*, Springer-Verlag, 1991.
- [3] Igarashi, S., Tsuji, T., Mizutani, T. and Haraguchi, T. : Experiments on Computerized Piano Accompaniment, *Proc. of International Comput. Music Conf.*, 1993, pp. 415-417.
- [4] Luckham, D. : *Programming with Specifications*, Springer-Verlag, 1990.
- [5] 水谷 哲也, 五十嵐 滋, 小宮山 弘樹, 辻 尚史 : 一 二の並行プロセスの検証問題について, 第34回プログラミングシンポジウム報告集, 1993, pp. 105-116.
- [6] 塩 雅之, 五十嵐 滋, 辻 尚史, 水谷 哲也, 白銀 哲也 : 時間の論理の束モデルの2次元的解釈, 応用数学合同研究会報告集, 1994, pp. 5-1 - 5-6.
- [7] 白銀 哲也, 五十嵐 滋, 辻 尚史, 和野 千春, 水谷 哲也 : 時間の論理の束モデルの拡張, 応用数学合同研究会報告集, 1994, pp. 6-1 - 6-3.
- [8] 白銀 哲也, 五十嵐 滋, 辻 尚史, 水谷 哲也 : ランデブーを用いた自動伴奏システムのモデル化と検証, 応用数学合同研究会報告集, 1994, pp. 9-1 - 9-6.