

製造 KPI シミュレーションを用いた標準時間の適正化技術

黄 双全 宗形 聡 浦邊 信太郎

(株) 日立ソリューションズ東日本

1. はじめに

多品種少量・受注生産では、厳しい環境の中で競争力を強化するため、機会損失や納期遅れなどを防ぐ高精度の生産スケジューリングが求められている。生産スケジューリングは事前に設定した設備や工程、品目などのマスタに基づき立案される。しかし、実際の工程の作業時間や段取り替え時間などは状況により変動するため、そうした変動を踏まえた生産実態を最も代表するマスタ値を設定することが高精度スケジューリングにとって重要である。

本稿では、納期に影響する標準時間 (ST) に着目し、各工程の ST と実際の作業時間との差異をもとに、ST の適正値を求める手法を提案する。

2. 標準時間適正化の課題

標準時間とは、その仕事に適性をもち習熟した作業者が所定の作業条件のもとで、必要な余裕をもち正常な作業ペースによって仕事を遂行するために必要とされる時間である。既存の設定手法としては、ストップウォッチ法やPTS法などのIEの代表的な手法[1]とモンテカルロ法を用いた適正化手法[2]がある。IE手法では、統計的な手法に基づき観測値の最頻値や平均値などを用いてSTを設定することが多い。一方、モンテカルロ法を用いた適正化手法では、生産能力最大化又は生産コスト最小化を目的とし最適なSTを求めていたが、納期遵守の視点からの考慮が十分でなかった。

STが生産実態よりも過大に設定されると、お客様の要求納期に応えられず販売の機会を失い、逸失利益を拡大させかねない。それとは逆に過小に設定されてしまうと、約束した納期を守れず顧客満足度の低下に繋がる。このため、機会損失の低減と顧客満足度の向上を両立させるようなSTの設定値を求めることが必要とされる。

3. 標準時間の適正化手法の提案

本研究では、ST の設定値が変わった際にトレードオフの関係を持つ複数の製造に関わる重要業績指標 (製造 KPI) [3]同士がどう変わるかをシミュレーションし、各 KPI が同時に最適になるような ST の設定値を求める手法を提案する。製造 KPI のシミュ

レーションモデルを定式化する前に、まずは生産スケジューリングと生産シミュレーションのロジックを表す関数を定義する。

生産スケジューリングとは、計画対象となる各オーダーに属する一連の作業をいつからいつまでどの設備で処理するのかを決めることである。各作業の担当設備、開始時刻および終了時刻を決めることを割付とも呼び、作業*i*の割付 $s_i = (\text{担当設備, 開始時刻, 終了時刻})_i$ とする。適正化対象となる n 工程の ST の設定値を変数 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ とすると、 l 個の作業割付の結果 \mathbf{s} を求める関数を式(1)で表す。

$$\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_l)^T = \mathbf{S}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

一方、割付 \mathbf{S} に定められた作業順序に従い作業を実施する際に実際の作業時間 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ が ST の設定値 \mathbf{x} と異なると、各作業の開始および終了時刻がずれてくる。このずれた時間を求めることを生産シミュレーションと呼び、生産シミュレーションでの割付の結果 \mathbf{w} を求める関数を式(2)で表す。

$$\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_l)^T = \mathbf{W}(\mathbf{S}(\mathbf{x}), \mathbf{y}) \quad (2)$$

そこで、式(1)と(2)の割付 \mathbf{S} と \mathbf{W} を用いて製造 KPI を求める関数を $h(\mathbf{S}, \mathbf{W}, \mathbf{x})$ とする。 k 個の製造 KPI が同時に最大になるように ST の設定値 \mathbf{x} を求める場合、それに関する多目的最適化問題を式(3)で表す。

$$(h_1(\mathbf{S}, \mathbf{W}, \mathbf{x}), \dots, h_k(\mathbf{S}, \mathbf{W}, \mathbf{x})) \rightarrow \text{最大} \quad (3)$$

なお、上記の最適問題を解く方法には各種の手法があるが、本研究では加重でスカラー化[4]した目的関数 $H(\mathbf{S}, \mathbf{W}, \mathbf{x})$ の最適解を求めた。

本稿は、納期に関わる製造 KPI として、トレードオフ関係を持つ要求納期対応率と約束納期遵守率を導入し、ST の適正値を求める方法について述べる。

(1) 要求納期対応率 $h_1(\mathbf{S}, \mathbf{W}, \mathbf{x})$

要求納期対応率は、顧客のオーダーを受け入れる度合いを表す KPI であり、要求納期より早い納期を回答できたオーダーの割合を用いて算出する。ST の設定値 \mathbf{x} に基づいた計算式は式(4)を用いて表す。

$$h_1(\mathbf{S}, \mathbf{W}, \mathbf{x}) = \frac{1}{m} \left(\mathbf{I}^T \cdot \delta(\mathbf{a} - \mathbf{f}(\mathbf{S}(\mathbf{x}))) \right) \quad (4)$$

ここで、 m 、 \mathbf{a} がそれぞれ計画対象となるオーダーの数とオーダー毎の要求納期を表すベクトルである。 \mathbf{I} が全要素が 1 の m 次元ベクトルである。 $\mathbf{f}(\mathbf{S}(\mathbf{x}))$ が作業の割付の結果からオーダーの完了時刻を求める関数である。任意のベクトル $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_m)^T$ に対

Research of Standard Time Optimization Using
Manufacturing KPIs Simulation.
Shuangquan Huang, Satoshi Munakata, Shintaro Urabe.
Hitachi Solutions East Japan, Ltd.

して、 $\delta(\mathbf{z}) = (\delta(z_1), \dots, \delta(z_m))^T$ がある。ただし、 $z \geq 0$ の時、 $\delta(z) = 1$ 。その他、 $\delta(z) = 0$ 。

(2) 約束納期遵守率 $h_2(\mathbf{S}, \mathbf{W}, \mathbf{x})$

約束納期遵守率は、顧客に約束した納期を守る度合いを表す KPI であり、約束納期より早く完了したオーダの割合を用いて算出する。ST の設定値 \mathbf{x} に基づいた計算式は式(5)を用いて表す。

$$h_2(\mathbf{S}, \mathbf{W}, \mathbf{x}) = \frac{1}{m} \int_0^\infty \dots \int_0^\infty P(\mathbf{y}) \cdot \left(I^T \cdot \delta(f(\mathbf{S}(\mathbf{x})) - f(\mathbf{W}(\mathbf{S}(\mathbf{x}), \mathbf{y}))) \right) dy_1 \dots dy_n \quad (5)$$

ここで、 $P(\mathbf{y})$ が作業時間 \mathbf{y} の確率密度関数である。本研究では、生産スケジューリングの割付 \mathbf{S} にディスパッチング法[2]を利用した。また、生産シミュレーションの割付 \mathbf{W} は生産スケジューリングの結果に基づき、ディスパッチングに加えて下記の3つの制約条件を付加したものにした。

設備制約 生産可能設備が複数あっても生産スケジューリング時に指定された生産設備を変更しない制約。

順序制約 生産スケジューリング時に同じ設備に割り付けられた作業間の順序関係を遵守し、同じ設備に属するすべての先行作業が完了しない限り作業が開始できない制約。

時間制約 作業毎の計画された開始時間に対して、1)前工程の作業が遅れた場合、後工程の作業開始を遅らせる、2)同じ設備に属する先行作業が遅れた場合、後継作業の開始を遅らせる、3)前工程の作業と先行作業が共に早く完了した場合、後継作業は予定通りに開始させる制約。

4. 評価実験

提案手法の有効性を検証するため、金属加工・組立製造を想定したデータを用いて評価を行った。実験データでは、金属加工によって成型する4部品と、それらの部品から組み立てられた2製品を扱っている。4部品の生産方式はジョブショップ（切削、バリ取りや洗浄などの計8種類の工程）であり、それぞれの部品が異なる工程を経て完成される。2製品の生産方式がフローショップであり、共に組立と検査の工程を経て完成される。

一方、製品間のオーダ構成比率や特急オーダを含む短納期オーダの有無、要求納期が週末又は月末に集中するかどうかなどといった観点の組合せからオーダデータを10パターン用意した。各オーダの数量は3から6までの間の数値を用いて無作為に割り振った。適正化対象工程は部品Bのバリ取りの1つの工程としている。また、従来手法は作業時間の最頻値や平均値などを推奨値としたIE手法である。

1つのオーダパターンの実験結果を図1に示す。製造KPIのシミュレーション結果は1分間を刻みに

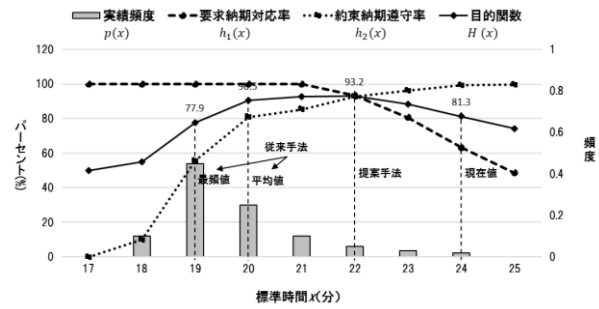


図 1. 実験結果

したものである。ST の設定値 \mathbf{x} の増加に伴って約束納期遵守率 $h_1(\mathbf{x})$ が単調増加する一方、要求納期対応率 $h_2(\mathbf{x})$ が単調減少していると確認できた。目的関数 $H(\mathbf{x})$ は ST の設定値が 22 のときに最大になるため、提案手法は ST の設定値として 22 を推奨する。従来手法と比べて、提案手法の推奨値では要求納期対応率がやや低減したが、約束納期遵守率が大きく改善されたため、要求納期対応率と約束納期遵守率とのバランスをとることを可能にした。

また、全パターンの中で、パターンによって提案手法の推奨値が 22 の前後に変動するが、どちらも従来手法の推奨値より同等又はその以上の総合評価を得られた。提案手法と従来手法の総合評価を対応のある t 検定により検証した結果を表 1 に示す。従来手法のいずれもより 1% 水準で有意に高いことが認められた。したがって、提案手法が販売機会損失の低減と顧客満足度の向上を両立させる ST の設定値を推奨可能で、従来手法より有効と考えられる。

表 1. 対応のある t 検定により検証した結果

従来手法	t 検定の結果			
	t 値	自由度	区間外確率	1% 水準の t 値
最頻値	7.38	9	4.2E-05	3.25
平均値	5.77	9	2.7E-04	3.25

5. おわりに

本稿では、トレードオフの関係を持つ製造 KPI のシミュレーションモデルを構築し、それぞれの製造 KPI が最適になるよう ST の設定値を適正化する手法を提案した。評価実験により提案手法の有効性を確認した。今後の課題として、生産実態に即しない ST を持つ工程の検知技術の開発が挙げられる。

参考文献

[1] 佐藤 知一, “革新的生産スケジューリング入門”, 日本能率協会マネジメントセンター, 2000.
 [2] 吉原 孝次, “処理時間の確率分布を考慮したスケジューリング装置”, 特許出願公開番号 2007-188306(2006.1.13).
 [3] David Parmenter, “Key Performance Indicators”, John Wiley & Sons, Inc, 2006.
 [4] 中山 弘隆, “あれもこれもよくしたい多目的計画法”, 1996 年度日本オペレーションズ・リサーチ学会, pp. 343-348, 1996.