スラブ型CO₂レーザーを用いた小片分割加工法の 芸術的プラスチック加工

櫻田 典世, 石井 良夫, 久保田 譲, 渡辺 一弘

創価大学大学院 工学研究科情報システム学専攻 (〒192-8577 東京都八王子市丹木町1-236)

Artistic Plastic-Material Processing by a Segmented Pixel Drawing Method Using a Slab CO₂ Laser

Noriyo SAKURADA, Yoshio ISHII, Yuzuru KUBOTA, and Kazuhiro WATANABE

Department of Information Systems Science, Faculty of Engineering, Soka University,
1-236, Tangi-cho, Hachioji, Tokyo 192-8577

(Received April 12, 2002)

A segmented pixel drawing method has been developed in order to create a tasteful artistic work for plastic materials. With this method, various artistic tastes were successfully realized on transparent plastics by combinations of visual effects and tones using a slab CO₂ laser which was operated in a segmented pixel-base scheme. A relationship of the system controlling parameters with the visual effects and tones has been quantitatively analyzed in terms of 3-visual effects and 8-tones which have been experimentally obtained. Tasteful artistic works have been interestingly printed on acrylic materials from digital images. Discussions on the evaluation for the printing effects and the detailed system configuration are given from the viewpoint of a viable laser sculpture system.

Key Words: Segmented pixel drawing method, Slab RF excited CO₂ laser, Artistic laser processing

1. はじめに

CO₂レーザーによる加工は、銅板等の各種材料の切断を中心に、溶接や表面改質へ応用されており、その加工機は電気・機械、電子・半導体、自動車、鉄鋼などさまざまな産業分野に導入され、製造ラインあるいは製造システムにおいて多用されている¹⁻⁴⁾。特に最近では、ハイピークパルスCO₂レーザーによる高密度実装プリント回路基板の微小穴あけ加工技術が開発され、実用化が進んでいる⁵⁾。他方、このような工業的加工分野とは対照的に、レーザー加工は、芸術的加工物の制作にも応用されている。この芸術的加工分野では、従来のマーキング法やマスキング法に加え、写真などの画像データのグレースケール階調をレーザー照射点の粗密によって材料表面に表現加工を行なう方法や、ビームをクリスタルなどの加工対象内部に集光することにより多光子吸収やフォトリフラクティブ効果⁶⁾を利用して中空加工を行なう方法などが実用化されている^{7,8)}。このような材料表面に画像を描画する従来の方法は、レーザーによる精密穴加工を行なう技術⁹⁾を応用し、元画像をより忠実に、いわば写實的に加工対象物に描写することを目的としている。

筆者らはこれまでに、従来法のように画像の階調を忠実に表現し、高解像度の画像表現加工を行なうだけでな

く、視覚効果を利用し、プラスチック材料を対象として芸術的“趣”も表現可能な小片分割加工法—Segmented Pixel Drawing法 (SPD法) を提案してきた^{10,11)}。実際のさまざまな芸術作品においても、千差万別な大きさがあり、精密さを追求した作品もあれば、風合や趣を重視した作品もあり、多種多様な表現方法が存在している。

本論文では、SPD法をもちいたプラスチック加工物における芸術的加工の一手法を確立するために、スラブ型CO₂レーザーによるSPD加工システムを構築し、制御パラメータと階調・視覚効果との関係を定量的に明らかにした。実験では、8階調・3視覚効果を実現し本加工法の特長を検討した。また、デジタル画像を元に、芸術的“趣”を有する芸術的加工物の制作を試みた。

2. SPD法

2.1 階調と視覚効果

従来の芸術的加工法とは異なるSPD法における特長は、元画像と加工対象面をそれぞれ小片単位に分割し、解析・加工を行なうことによって、元画像の質感をプラスチック加工材料表面に視覚効果として表現しようとする点にある。実際に画像の一画素から滑らかさなどの質感を判断する事は不可能であるため、このSPD法では、画像

中のいくつかの隣接画素を一単位として小片に分割し解析することによって元画像の質感を判断する。また、単一ドットのレーザー照射だけでは加工時に質感や階調を表現することは困難であるため、加工対象も小片に分割し、その小片ごとにレーザー照射のドット配置、密度、パルス幅や繰り返し周波数といった制御パラメータをさまざまに変化させて加工を行なうのである。このようにドット単位ではなく小片単位にて画像解析・レーザー加工を行なうことによって、加工における表現力を豊かにし、視覚効果の表現だけでなく階調表現も行なうことができる。

一般的な視覚効果による表現法の一例として、漫画を描く技法におけるスクリーンを挙げることができる。これは、点や線などのさまざまなテクスチャパターンが印刷された紙を小片に切り抜き、表現したい絵の上に貼り付ける技法である。このさまざまなテクスチャパターンの有する視覚効果によって、描画の質感、さらに色の濃淡を表現することが可能である。この技法では、特に点の集合パターンが多く使われており、点の大きさや密度によってさまざまな種類のパターンが用意されている。SPD法もこのスクリーンを用いたさまざまな画質表現と類似していると考えることができ、加工パターンを小片ごとに変化させることによって、さまざまな質感や階調表現が可能となる。

SPD法は加工対象を小片に分割し、その小片内に特長的なドット配置を行なうことを基本としている。表現可能な階調は一義的には、小片内のドット加工占有面積に依存するため、ドット照射時のドットの大きさと密度によって決定される。また、小片内を同一占有面積にて加工を行なう場合でも、照射するドット密度の違いによって視覚効果に変化が生じるため、さまざまな表現が可能となる。例えば、小片内を 3×3 ドットの正正方配列にて加工した場合と、各ドットの面積をその $3/4$ 倍とし、ドット数を 4×4 ドットの正正方配列にした場合では、小片内の加工占有面積が同じであるため階調は同一に表現されるが、視覚的には異なって見える。このような視覚的差異を視覚効果としてレーザー加工における芸術的表現に有効利用することがSPD法における最大の特長である。

2.2 元画像とSPD加工データ

元画像から加工データ作成までの流れをFig. 1に示す。初めにCCDカメラやスキャナなど画像入力装置によってコンピュータに加工データの元となる画像を取り込む。その画像はデジタル画像として画素(ピクセル)分割により構成されるため、本加工法において必要な各小片に対応した加工データを作成することは、主に他の加工法において用いられているマーキング法やマスキング法などと比べ容易である。次に、このデジタル画像を各ピクセルの輝度値情報のみを持つRAWデータ形式に変換する。このデータ形式に変換することにより、比較的単純なアルゴリズムによって画像解析が可能となる。このRAWデータ形式の元画像について、正正方状に隣接する数ピクセルを小片単位にグループ化し、小片内の全ピクセルについ

Fig. 1 Procedure of making a processing source data from a captured digital image together with laser dot configuration in a given pixel size for the processing source data.

て明度を反映する平均輝度値に対して加工小片の階調を、画像の滑らかさや粗雑さといった質感を反映する輝度値のばらつきに対して視覚効果をそれぞれ対応させるよう画像解析ならびに加工データの算出を行なう。これにより、レーザーをドット照射するX-Y座標位置とレーザーのパルス幅や繰り返し周波数を決定し、これらの情報を有するデータファイルを作成する。ここで算出される小片内のレーザー照射を行なうドット位置と小片の大きさの関係は、図中下部に示すとおり、任意の小片幅に対し、その幅をドット数にて等分した幅が各ドットの間隔となり、そのドット間隔の $1/2$ をドットと小片端までの間隔として決定される。ドット照射点と小片端に間隔を設けることにより、小片整列時に隣接小片同士の重複を防ぎ、小片間の境界線を目立たなくすることができる。最後に、算出されたデータファイルをスキャニングコントローラによって制御可能な加工データ形式に変換する。以上の手順によって一般的な画像から加工データの作成を行なう。

2.3 SPD加工システム

Fig. 2にSPD法における加工システムの構成図を示す。ここで用いるレーザーは、筆者らが開発した最大平均出力200 Wの高周波励起スラブ型CO₂レーザーである。このレーザーは、「小型軽量でありながら加工に十分な出力を有する」、「情報機器によるビームの制御性が高い」、「ビーム品質がよい」といった特長を有する¹²⁾。本実験では、平均出力を50 Wとし、繰り返し周波数を0.5~4 kHz、デューティ比を10~90 %に制御することによってドット照射時におけるパルス幅の制御を行なった。加工作業に先立ち、本研究室にて考案した紫外線CCDカメラを用いたレーザービームプロファイラ^{13,14)}によりレーザーのビー

Fig. 2 Experimental configuration of the SPD laser processing system with a slab RF excited CO₂ laser.

ム品質を確認し、さらに加工中の対象物についてサーモカメラにより熱解析^{15,16)}を行なうことによって、レーザー本体ならびに加工制御機の微調整を行ない、加工精度・再現性を確保した。加工制御系は、高周波電源とGeneral Scanning社製のX-Y-Z軸ガルバノメータから構成されており、スキャニングコントローラを介してパーソナルコンピュータによって制御される。高周波電源は、周波数100 MHz、最高出力2 kWであり、スキャニングコントローラから送られるレーザーのパルス幅と繰り返し周波数の情報を持ったTTL信号によってレーザー本体へ印可する電力の制御を行なった。本レーザーは印可される電力により、スラブ電極間の放電状態が変化し、レーザー出力レベルおよびON-OFF動作を制御することが可能である。光学制御系では、Z軸レンズならびにX-Y軸ミラーを、前述のガルバノメータにより駆動し、さらにZ軸レンズは、リニヤトランスレータを組み合わせた事により、回転運動から直線運動への変換を行ない駆動させた。Z軸レンズによって加工点におけるビーム径や焦点位置の制御を、X-Y

軸ミラーによって加工平面における照射位置の制御を行なった。レーザービームは複数のレンズとミラーから構成される光学系ならびに光学制御系を通過し加工対象物へ走査・照射される。X-Yスキャナによって加工対象面上にレーザーを走査できる範囲は、約 $8 \times 8 \text{ cm}^2$ 以内に限定されており、より大きな加工物を制作するためにX-Yスライドステージ(スライド幅200 mm)を用いた。これにより、加工対象物をX-Y方向に移動させ、約 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ の加工物を制作することが可能である。

3. 加工実験結果と検討

加工材料としてCO₂レーザーに対する吸収率の高い透明アクリル部材を用い、加工結果の背景を暗色とし、制御パラメータに対する小片の階調と視覚効果をそれぞれ評価した。透明アクリル部材上のレーザー照射点は、レーザーアブレーションにより白濁した照射痕を形成し透明度が低下するため、背面を暗色することによってレーザー非照射部との明度差が視覚的差異を生み出すことになり、より良い評価が可能となる。アクリル部材の加工されるエネルギー閾値を超えるエネルギーが照射された部分のみ照射痕が形成されるため、ガウス分布を有するレーザービームのエネルギー強度分布によって、レーザーパワーと照射時間を制御することにより、照射痕の大きさを変化させることが可能である。照射痕の大きさは、Z軸レンズによりビーム径を制御することによっても変化させることができるが、ビーム径を大きくすることにより照射痕の輪郭がぼやけてしまうため、本実験では前者の方法を採用した。

Fig. 3に制御パラメータの違いによる異なった階調と視覚効果をもった加工実験結果を示す。Fig. 3(a)はデータ

Fig. 3 A SPD pallet (a) of 8-tones and 3-visual effects for the printed example of a dome (b) based on an original picture (c) and an enlarged picture of the dotted square region in (b).

ベースとして作成した各種小片のパレット、(b)はSPD加工実験結果、(c)は元画像、(d)は(b)内の点線範囲の拡大図である。小片パレット(a)は、レーザー照射の配置、密度、パルス幅や繰り返し周波数といった制御パラメータのさまざまな組み合わせにより作成された約200個の小片群より、階調表現と視覚効果表現に適した小片のみを選択し列挙したものである。各小片の大きさは $2 \times 2 \text{ mm}^2$ であり、図中の小片パレットは、各小片を16個正正方配列したものである。左右で階調(Tone)の変化、上下で視覚効果(Visual effect)の変化を示す。階調は小片内における加工占有面積の違いによって表現され、左側が暗階調(黒)で右側に向かって順に明階調(白)になるよう整理している。加工による階調は図に示すとおり7段階あり、無加工部分を最暗階調として、合計8階調を作成した。本実験では、小片面積 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 内に重複せずに加工可能な最大ドット数が約80ドット程度であるため、各階調の視覚的差異を顕著に表現するために8階調としたが、小片サイズを大きくすることにより、より多くの階調が作成可能であると考えられる。他方、視覚効果は加工照射点数の違いによって表現され、粗密の3段階を作成し、上段のドット数の多い方が滑らかな、下段の少ない方が粗い視覚効果を有している。制御パラメータの例として、第1階調の粗い視覚効果の小片は 3×3 ドット、パルス幅0.45 ms、繰り返し周波数2 kHzにてレーザー制御を行ない、その1ドットあたりの照射エネルギーは22.5 mJ/dotである。また、第3階調の粗い視覚効果の小片では、1ドットあたりの照射エネルギーが45.0 mJ/dotであり、照射エネルギーの制御によってドットの加工面積が大きくなるよう制御した。SPD加工実験結果(b)は画像(c)を元に、 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ の小片を100 $\times$ 100個配列し制作したもので、全体の大きさは20 $\times$ 20 cm^2 である。手前の地面や建物といった人工的な部分と、空の雲や木といった自然対象の部分では、同一階調による加工でも異なる視覚効果にて加工を行なっているため微妙な違いを表現できている。拡大図(d)を見ると、階調ならびに視覚効果がドット照射の集合によって表現されていることがわかる。この加工では、加工対象の範囲がX-Yスキャナミラーの走査範囲よりも大きいため加工対象を16分割しX-Yステージを用いて移動させ加工を行なったために、ステージ座標平面とスキャナ座標平面の直交度ならびに正方形の微妙な誤差により分割部分に境界が見られる。

Fig. 4に小片サイズを $1 \times 1 \text{ mm}^2$ として、5階調による加工実験結果を示す。加工実験結果の大きさは、X-Yステージによる移動の必要がない $5.6 \times 5.6 \text{ cm}^2$ である。小片サイズを小さくすることによって、小片内の加工可能な最大ドット数が減少するために、表現可能な階調数が減少してしまうが、比較的に細かい加工が可能になる。サッカーボールのように濃淡がはっきりとし、形状の単純な素材の表現に対しても、十分な表現力を有していることがわかる。

前述までのSPD法では小片内のドット照射位置を正正方配列状に配置して行なっていたが、Fig. 5に乱数を用いてドット配置を行なった加工実験結果を示す。階調はピク

Fig. 4 A SPD pallet(a) of 5-tones for a soccer ball example (b) based on an original picture (c) with an enlarged picture(d) for the dotted square region in (b).

Fig. 5 A SPD pallet (a) of 9-tones with a random dots arrangement for a panda example (b) based on an original picture (c), and (d) an enlarged picture of the dotted square region in (b).

セル内の平均ドット密度によって表現され、ここでは平均ドット密度を階調に応じて対数関数的に決定している。これは、人の目の明度に対する視覚感度が、絶対的な明度値よりはむしろ明度レベルの比率に対して高いことをふまえ、ドット密度を階調に対し等間隔ではなく対数関数的に変化させた。Fig. 5では、小片サイズを $2 \times 2 \text{ mm}^2$ とし、階調を9階調作成した。加工実験結果の大きさは20 $\times$ 20 cm^2 である。加工実験結果を見ると、前述までのSPD法とは異なった、滑らかで自然な風合の点描画のような視覚効果を得ることができた。

SPD法を応用し、同一点にドット照射を繰り返すことによって深さを有する加工物を作成することも可能である。この場合、深さが主に照射回数に依存するため、深さの容易な制御が可能である。ドット照射によって深さ

を出すため、加工表面が白濁してしまうが、白濁面にZ軸を駆動したディフォーカスビームを照射することによって透明度を上げ、透明に加工された面に、さらにSPD加工を行ない、さまざまな視覚効果を表現する。このように、SPD法をさらに発展させることにより、完全な立体彫刻物というよりは、カメオやインタリオのような擬似三次元的彫刻物の制作も可能となると考えられる。

4. おわりに

本研究では、新しい芸術的加工法として、小片分割加工法—Segmented Pixel Drawing法 (SPD法) の加工システムを構築し、画像を元にいくつかの異なった趣を有する芸術的加工物を制作した。SPD法は加工範囲を小片に分割し、小片ごとに異なった制御パラメータにて加工を行なうことにより、各小片にそれぞれ異なった視覚効果と階調を作成表現することが可能であることが実験的に明らかになった。

今回の実験では、加工対象物として透明アクリル部材を使用した。レーザーを照射することによって照射点に視覚的变化の現れる部材であれば同様の加工が期待できる。例えば、黒アルマイトを施したアルミ材の場合は、レーザー照射によってアルマイト膜のみが蒸散し、その部分のみアルミ材の光沢が表れるため、本実験と同じような効果を得ることができると考えられる。

謝 辞

本研究を進めるうえで、SPD加工装置の構築と実験に協力をいただいた、工学研究科情報システム学専攻博士前期課程の戎谷一氏、岩本正志氏、藤原広和氏に感謝致します。

参考文献

- 1) K. Bondelie: *Laser Focus World*, Aug. (1996) 95.
- 2) G. Ogura, J. Angell, and D. Wall: *Laser Focus World*, Jun. (1998) 117.
- 3) 永井 治彦: レーザー研究 **28** (2000) 2.
- 4) 城戸 基, 浜田 直也, 杉橋 敦史, 山本 博之, 小原 昌弘, 西林 茂, 南田 勝宏, 菊間 敏夫: レーザー研究 **29** (2001) 318.
- 5) 佐藤 行雄, 西前 順一, 岩田 明彦, 竹野 祥瑞, 福島 司, 金岡 優: レーザー研究 **28** (2000) 19.
- 6) 的場 修, 志村 努, 黒田 和男: レーザー研究 **26** (1998) 144.
- 7) 林 健一: レーザー研究 **28** (2000) 40.
- 8) S. Kawata, H. Sun, T. Tanaka, and K. Takada: *Nature* **412** (2001) 697.
- 9) 窪田 恵一: レーザー研究 **28** (2000) 3.
- 10) N. Sakurada, Y. Ishii, H. Ebisutani, K. Watanabe, and Y. Kubota: *Proceedings of SPIE*, Osaka, November, 1999, Vol. 3887, p. 349.
- 11) H. Ebisutani, N. Sakurada, Y. Ishii, K. Watanabe, and Y. Kubota: *Proceedings of SPIE*, Florence, September, 2000, Vol. 4184, p. 575.
- 12) 渡辺 一弘: レーザー研究 **21** (1993) 1245.
- 13) Y. Ishii, N. Sakurada, T. Sugimori, K. Watanabe, Y. Kubota, and K. Nagano: *CDROM proceedings of the 8th International Symposium on Flow Visualization*, Sorrento, September, 1998, No. 249.
- 14) N. Sakurada, Y. Ishii, K. Watanabe, and Y. Kubota: *J. Visualization* **4** (2001) No. 4, 349.
- 15) N. Sakurada, Y. Ishii, H. Ebisutani, K. Watanabe, and Y. Kubota: *CDROM proceedings of the 9th International Symposium on Flow Visualization*, Edinburgh, August (2000) No. 261.
- 16) N. Sakurada, M. Iwamoto, H. Ebisutani, Y. Ishii, K. Watanabe, and Y. Kubota: *Proceedings of SPIE*, Florence, September **4184** (2000) p. 607.