13-143-2 Er:YAG レーザを用いた

寛骨臼回転骨切り術用マニピュレータの開発

A Bone Cutting Manipulator Using Er: YAG laser for Rotational Acetabular Osteotomy

○金大永、大和田秀明、波多伸彦、土肥健純
東京大学大学院情報理工学系研究科

D. Kim, H. Owada, N. Hata, T. Dohi

Department of Mechano-Informatics, Graduate school of information science, the University of Tokyo

1. はじめに

寛骨臼回転骨切り術 (Rotational Acetabular Osteotomy : RAO) は変形性股関節症の治療法として、股関節機能を温存したまま生体力学的に安定な形態に関節を变形する。人工股関節を用いる術とは違い、唯一解剖学的にも力学的にも正常に近い関節を形成できる大変優れた術である。しかし、本術は、十分な精度を出すため熟練した技術を要し、大きい切開により侵襲も比較的大きな術となっている。

十分な精度と低侵襲的な手術のため、本研究では水への吸収率が高い Er:YAG レーザでの骨切りを行なう。レーザを用いた骨切りは、切除時の反動が少なく、任意の部位を的確に切除することができ、複雑な形でも精度良く切ることができる。また、進入部が小さく、低侵襲で患者への負担が少ない。

しかし、股関節の周りには筋肉や靭帯などがあるため、骨との間に作業空間を安全に確保する必要がある。また、精度を良くするためには骨とレーザ照射部との位置を保ち、レーザ照射部と骨の表面までの距離も維持する必要がある。

そこで本研究では、より良い精度を持つ骨切りのために、Er:YAG レーザを用いた寛骨臼回転骨切り術用マニピュレータの開発を行なう。製作したマニピュレータの評価としては、円弧状に切った切除部の曲率半径、切除効率、温度の上昇を測定する。

2. 方法

製作したマニピュレータは剥離部とレーザ照射部から構成される。マニピュレータはパッシブホルダに固定され、骨にマウントした状態で駆動される (Fig.1)。剥離部は

骨とマニピュレータの位置を固定するためのマウント機構と剥離機構から構成され、レーザ照射部は円く切るための円弧状切除機構と、照射部と骨との距離を保つ間隔維持機構から構成されている。完成した剥離部を Fig.2 に、レーザ照射部を Fig.3 に示す。

2.1 剥離部

マウント機構は上下振動防止の4本のピンと、滑り止めの4本のピンで行なう。剥離機構はマウント機構の上に固定される。リンク機構により剥離用のブレードが前進し、ストッパーによって上下運動を始め、筋肉などを骨から剥離し、レーザ照射のための作業空間を確保する。

2.2 レーザ照射部

円弧状切除機構には4節リンクを用いており、一定の曲率 (曲率半径 30mm) で切除することが容易である。間隔維持機構は、骨切りの際、血液や骨の欠片等の劣悪な環境下でも動作可能な接触式である。プローブ先端部にかかる力を力センサに伝達し、その値によりプローブを上下させ、間隔を維持する。

Fig. 1. System configuration. Passive holder holds detacher; irradiator is manipulated on the detacher.

3. 評価実験

評価用には平らな表面を持つブタの肩甲骨を用いた。密度は 1.73 g/cm^3 (測定値) であり、表面を曲率半径 30mm で Er:YAG レーザ (Prototype: Hoya Photonics Co., $l=2.96 \text{ mm}$, pulse duration $t_p=200 \text{ msec}$, $f=20 \text{ Hz}$) で重複レーザ照射数が 4 から 8 までになるよう、レーザ照射部の速度を調節しながらマニピュレータを駆動した。

$$v = (1 - \eta) W f \quad (1)$$

v : moving velocity of the laser beam, η : overlapping ratio,
 W : width of the beam, f : pulse frequency of the Er:YAG laser

骨の炭化作用を防ぐために使用した冷却水は 17°C で $3 - 5 \text{ ml/min}$ の流量であり、照射の際、サーモグラフィーにより骨の温度上昇をリアルタイムで測定した。

4. 実験結果

曲率半径は $30.0 \pm 0.3 \text{ mm}$ であった。ある一点に対して重複照射される回数をパラメータとして、深さ、幅の切除量を計測した。重複レーザ照射数と量を Fig.4 に示す。レーザビームの移動速度が 1.8 mm/sec の際、骨の切除率は $0.21 \text{ mm}^3/\text{secW}$ で最大であった。サーモグラフィーにより温度測定の結果、レーザ照射口直下の水面温度は最高 41.7°C であり、5 秒以上保たなかった。また、高温の範囲はレーザ照射口直下から半径 5mm 程度であった。重複レーザ照射数 5 で 6 回繰り返した結果を Fig.5 に示す。

5. まとめ

寛骨臼回転骨切り術に適用可能なマニピュレータを製作した。腸骨にマニピュレータを固定して剥離し、作業空間を確保することによって、 $\pm 0.3\text{mm}$ のより精度の良い骨切りが可能であった。レーザビームの移動速度が 1.8 mm/sec の際、骨の切除率は $0.21 \text{ mm}^3/\text{secW}$ で最大であり、半径 30mm で 90° の円弧を深さ 2mm で 30 分以内に切ることができる。骨に損傷を与えるほどの温度の上昇は見られず、骨の炭化も見られなかったことにより、臨床応用への可能性をみせた。

今後はより低侵襲の手術が可能になるようにより小型化する必要があり、レーザ照射部が曲がる機構の研究や、効果的な冷却方法も研究すべきである。

謝辞

本研究の一部は、医薬品機構委託研究 PJ MF-15 による。また、江口部長をはじめとする HOYA フォトニクス (株) の方々に実験装置の提供など、ご協力を頂いた。

Fig. 2. Detachment mechanism. When the blade slides under muscle, it is lifted 40 mm using link mechanism.

Fig. 3. Irradiation mechanism. The sapphire tip is covered with cap, and the tip slips on the bone with the force of spring.

Fig. 4. Irradiation efficacy. The efficacy is the best when the overlapped irradiated number is five.

Fig. 5. Ablated locus on the bone (a) Surface (b) Ablated cross-sectional view. The bone is irradiated six times with overlapping ratio 0.8.

参考文献

- [1] Nelson JS, Orenstein A, Liaw LL, Berns MW, "Mid-infrared Erbium: YAG laser ablation of bone: the effect of laser osteotomy on bone healing", Lasers Surg Med, vol. 9, pp. 362-374 1989.
- [2] Walsh JT, Flotte TJ, Deutsch TF, "Er: YAG laser ablation of tissue: effect of pulse duration and tissue type on thermal damage", Lasers Surg Med, vol. 9, pp. 314-326, 1989.